

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Telecomunicações
e Controle

ISSN 1517-3550

BT/PTC/0409

Cavidades Carregadas – Estudo da
Perturbação dos Campos
Eletromagnéticos

Augusto Carlos Pavão
Jorge Mieczyslaw Janiszewski

São Paulo – 2004

14/24/11

O presente trabalho é um resumo da tese de doutorado apresentada por Augusto Carlos Pavão, sob orientação do Prof. Dr. Jorge Mieczyslaw Janiszewski: "Cavidades Carregadas – Estudo da Perturbação dos Campos Eletromagnéticos", defendida em 19/04/04, na Escola Politécnica.

A íntegra da tese encontra-se à disposição com o autor e na Biblioteca de Engenharia de Eletricidade da Escola Politécnica/USP.

FICHA CATALOGRÁFICA

Pavão, Augusto Carlos

Cavidades carregadas : estudo da perturbação dos campos eletromagnéticos / Augusto Carlos Pavão, Jorge Mieczyslaw Janiszewski. -- São Paulo : EPUSP, 2004.

16 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle ; BT/PTC/0409)

1. Campo eletromagnético 2. Tecnologia de microondas
I. Janiszewski, Jorge Mieczyslaw II. Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle III. Título IV. Série
ISSN 1517-3550

CDD 537.811
621.3813

CAVIDADES CARREGADAS – ESTUDO DA PERTURBAÇÃO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

Augusto Carlos Pavão e Jorge Mieczyslaw Janiszewski

RESUMO

Cavidades carregadas com materiais dielétricos com e sem perdas são elementos presentes em vários problemas de Engenharia Elétrica, tais como a determinação de constantes dielétricas, o aquecimento de materiais por microondas e a atenuação de modos ressonantes em câmaras blindadas. Esses problemas têm sido estudados através de modelagens específicas.

Com o objetivo de analisar a perturbação dos campos eletromagnéticos pelos corpos dielétricos sob um ponto de vista global e, portanto, adquirir um conhecimento mais geral desses problemas, implementou-se uma formulação analítica e um modelo computacional para a determinação dos valores de intensidade dos campos na presença de dielétricos. A formulação analítica aplica-se a geometrias simples, enquanto que o modelo computacional permite a análise de situações mais complexas. Foram analisadas a sensibilidade paramétrica e a estabilidade do modelo computacional desenvolvido e os resultados foram validados através de comparações com dados analíticos e experimentais.

O modelo foi aplicado a casos de interesse para extrair correlações genéricas entre forma e condutividade equivalente dos corpos dielétricos e a configuração dos campos elétrico e magnético na cavidade. Os campos foram analisados no domínio da frequência e do tempo através de módulos de visualização desenvolvidos especificamente para este trabalho.

Os resultados obtidos permitem prever, em função dos corpos dielétricos, características de distribuição da energia no domínio da frequência e da distribuição espacial dos campos elétrico e magnético para uma determinada frequência.

ABSTRACT

Loaded cavities with lossy or lossless dielectric materials play an important role in several electrical engineering problems, as microwave heating, dielectric constant determination and resonant mode damping in shielded rooms. These problems have been studied through specific modeling.

In order to analyze the electromagnetic fields disturbance in a global point of view aiming at a more general knowledge of these problems, an analytical formulation and a computational model were developed to determine the field intensity values in the presence of dielectrics. The analytical formulation applies to simple shapes and the computational model allows the analysis of complex ones. The parametric sensitivity and the stability of the computational model were analyzed and the results have been validated through comparison with analytical and experimental data.

The model was applied to practical situations to extract generic relations between (1) the shape and equivalent conductivity of dielectric bodies and (2) the electric and magnetic field configuration inside the cavity. The fields were analyzed both in the time and frequency domains with the aid of visualization modules specifically developed for this work.

The results allow to foresee, as a function of the dielectric bodies, energy distribution characteristics in the frequency domain and the spacial distribution of the electric and magnetic fields for a specific frequency.

1 Introdução

O objetivo deste trabalho é o estudo dos campos eletromagnéticos em cavidades retangulares parcialmente preenchidas por dielétricos, mediante uma análise a mais genérica possível com relação às seguintes variáveis: dimensão da cavidade, constantes materiais do dielétrico e sua forma e localização dentro da cavidade. A análise é conduzida de forma analítica, numérica e experimental. Para cada tipo de análise são discutidas as limitações do modelo em questão. Por se tratar de um estudo de perturbação de campos, técnicas específicas de visualização foram desenvolvidas para este fim.

A motivação deste trabalho, de caráter geral, foi a de que a análise de campos ou modos de propagação envolvendo guias e cavidades parcialmente preenchidos com dielétricos ou com seções modificadas tem sido feita apenas de forma específica em diversos problemas de interesse prático, tais como determinação de constantes dielétricas através de amostras em cavidades [1, 2, 3], aquecimento industrial em cavidades de microondas [4, 5, 6], amortecimento de modos de ressonância em câmaras blindadas utilizadas em compatibilidade eletromagnética [7, 8] e aumento da faixa de trabalho em guias de microondas [9, 10, 11].

Assim, visando um tratamento unificado de diversos problemas de interesse, neste trabalho são realizados:

- adequação de uma formulação analítica do problema;
- desenvolvimento de um procedimento computacional eficiente, baseado no Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD);
- desenvolvimento de ferramentas de visualização de campos eletromagnéticos;
- análise paramétrica.

A solução dos problemas citados através de métodos numéricos é comum. Entre os métodos empregados, o FDTD é muito utilizado. Esse método, primeiramente formulado por Yee [12], tem uma implementação relativamente simples e permite a simulação de diferentes meios materiais com geometria complexa [13]. As soluções analíticas implementadas nos casos de medidas de propriedades dielétricas e aquecimento de materiais são restritas à determinação das frequências de ressonância e eventualmente dos campos nessa condição. No caso da redução das amplitudes dos campos dos modos de ressonância em câmaras blindadas, apenas soluções empíricas e resultados experimentais foram informados nos trabalhos analisados. Dada a especificidade dos trabalhos existentes, este é um estudo de caráter genérico sobre as alterações provocadas nos campos dentro de uma cavidade carregada por um dielétrico com perdas e em uma determinada faixa de frequências, visando um conhecimento mais geral de um problema que tem sido observado e analisado de formas diversas e específicas.

2 Descrição do problema e formulação teórica

O presente trabalho é uma generalização de solução para o problema de configuração de campos em cavidades parcialmente preenchidas com corpos dielétricos com e sem perdas. A configuração que servirá de base para o desenvolvimento deste trabalho é a descrita na figura 1. Nessa figura uma cavidade retangular metálica é parcialmente preenchida por um corpo dielétrico de espessura e e seção transversal igual à da cavidade, posicionado em $z = z_0$. Em [1], Sucher desenvolve uma solução baseada na teoria de linhas de transmissão que obtém os campos E_y, H_x e H_z apenas para o modo TE_{101} .

Partindo da configuração inicial indicada na figura 1 podem ser desenvolvidos dois tipos derivados de configurações de carregamento ou com um conjunto de placas dielétricas finas posicionadas em regiões de campo elétrico máximo ou com a geometria de um paralelepípedo dielétrico com dimensões e localização genéricas. No primeiro caso, a análise pode ser feita por modelo teórico ou computacional e a segunda configuração, devido à maior dificuldade de equacionamento, é analisada exclusivamente através do modelo computacional.

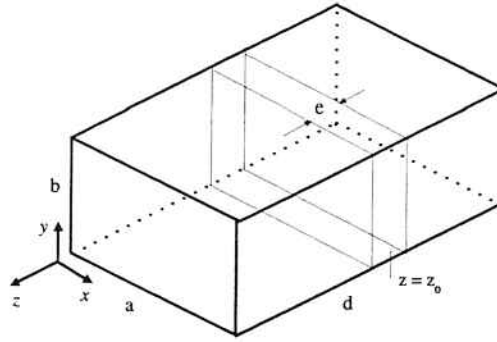


Figura 1: Cavidade retangular com dielétrico no centro.

2.1 Campos E e H no modo TE_{101}

A partir de condições de contorno na cavidade e das expressões genéricas dos modos na cavidade, chega-se às expressões para os campos E_y , H_x e H_z na cavidade contendo a lâmina dielétrica, no modo TE_{101} , tomando como referência a figura 1, com $z_0 = \frac{d}{2}$. Considerando-se uma lâmina dielétrica estreita em relação ao comprimento de onda na ressonância, as constantes de propagação utilizadas foram aproximadas, desprezando as perdas devido ao parâmetro ϵ'' . Em vista dessas considerações obtêm-se as expressões para os campos, em função das coordenadas x e z , em que os subscritos 0 e ϵ indicam campos nas regiões em que os meios são, respectivamente, o vácuo e o dielétrico.

$$E_{y0}(x, z) = jE_0 \sin(\beta_{z0}z) \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (1)$$

$$H_{x0}(x, z) = \frac{E_0}{Z_{r\epsilon_0}} \cos(\beta_{z0}z) \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (2)$$

$$H_{z0}(x, z) = \frac{-E_0\lambda_0}{\eta_0 2a} \sin(\beta_{z0}z) \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (3)$$

$$E_{y\epsilon}(x, z) = jE_0 \left[\sin\left(\beta_{z0}\frac{d-e}{2}\right) \cos\left(\beta_{z\epsilon}\left(z - \frac{d-e}{2}\right)\right) + \frac{\beta_{z0}}{\beta_{z\epsilon}} \cos\left(\beta_{z0}\frac{d-e}{2}\right) \sin\left(\beta_{z\epsilon}\left(z - \frac{d-e}{2}\right)\right) \right] \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (4)$$

$$H_{x\epsilon}(x, z) = E_0 \left[\frac{1}{Z_{r\epsilon_0}} \cos\left(\beta_{z0}\frac{d-e}{2}\right) \cos\left(\beta_{z\epsilon}\left(z - \frac{d-e}{2}\right)\right) - \frac{1}{Z_{r\epsilon\epsilon}} \sin\left(\beta_{z0}\frac{d-e}{2}\right) \sin\left(\beta_{z\epsilon}\left(z - \frac{d-e}{2}\right)\right) \right] \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (5)$$

$$H_{z\epsilon}(x, z) = \frac{-E_0\lambda_0}{2a\eta_0} \left[\sin\left(\beta_{z0}\frac{d-e}{2}\right) \cos\left(\beta_{z\epsilon}\left(z - \frac{d-e}{2}\right)\right) + \frac{\beta_{z0}}{\beta_{z\epsilon}} \cos\left(\beta_{z0}\frac{d-e}{2}\right) \sin\left(\beta_{z\epsilon}\left(z - \frac{d-e}{2}\right)\right) \right] \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (6)$$

com

$$\begin{aligned}\eta_0 &= \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \\ \lambda_0 &= \text{comprimento de onda no vácuo.}\end{aligned}$$

e E_0 uma constante que representa uma intensidade arbitrária de campo. Utilizando as equações dos campos, calculam-se as integrais de energia e de perdas descritas anteriormente, as quais são aplicadas somente na região de $z = 0$ a $z = d/2$, que é totalmente simétrica ao restante da cavidade, não alterando assim os valores obtidos para o fator de mérito.

2.2 Análise paramétrica

Utilizando o equacionamento obtido, pode ser realizada uma análise paramétrica, variando-se:

- a parte imaginária da permissividade relativa do dielétrico, ϵ_r'' ;
- a espessura da lâmina dielétrica.

A presença do material dielétrico na cavidade afeta o fator de mérito, definido por

$$Q_{mnp} = \frac{\omega_{r,mnp} \cdot \text{Energia armazenada na cavidade}}{\text{Potência média dissipada}} \quad (7)$$

em que

Q_{mnp} : fator de mérito para o modo TE_{mnp}

$\omega_{r,mnp}$: frequência de ressonância do modo TE_{mnp} .

Se a cavidade estivesse preenchida por um único dielétrico sem perdas, a potência dissipada P_W seria a relativa às paredes da cavidade e essa potência depende da resistência superficial R_s do metal das paredes internas da cavidade e da distribuição da densidade de corrente $\mathbf{J}$ nessas paredes:

$$P_W = \frac{1}{2} \int_{S_c} R_s |\mathbf{J}|^2 dS \quad (8)$$

com

S_c : superfície interna da cavidade.

Para obter Q como função dos campos elétrico e magnético, deve-se expressar $\mathbf{J}$ na equação 8 por $\mathbf{J} = \mathbf{n} \times \mathbf{H}$, resultando:

$$P_W = \frac{1}{2} \int_{S_c} R_s |H_t|^2 dS \quad (9)$$

em que H_t é a componente do campo magnético tangente à superfície interna da cavidade.

Aplicando essas relações à definição dada pela equação 7, obtém-se, para uma cavidade uniformemente preenchida com um dielétrico sem perdas, a expressão:

$$Q_{mnp} = \frac{\omega_{r,mnp} \frac{\epsilon_0}{2} \int_{V_c} \epsilon_r' |\mathbf{E}|^2 dV}{\frac{1}{2} \int_{S_c} R_s |H_t|^2 dS} \quad (10)$$

Para obter, agora, o fator de mérito da cavidade (preenchida com ar) *carregada por uma lâmina dielétrica*, é necessário introduzir um termo relacionado à potência de perdas no dielétrico:

$$P_D = \frac{1}{2} \int_{V_A} \sigma_\epsilon |\mathbf{E}|^2 dV \quad (11)$$

com a condutividade equivalente do dielétrico dada por $\sigma_e = \omega \epsilon_r'' \epsilon_0$, sendo ϵ_r'' a parte imaginária da permissividade complexa relativa da lâmina e V_A o volume ocupado pela lâmina dielétrica. Pode-se, então, reescrever a equação 10 para esse caso:

$$Q_{A,mnp} = \frac{\omega_{r\epsilon,mnp} \left[\frac{\epsilon_0}{2} \int_{V_c-V_A} |\mathbf{E}|^2 dV + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r'}{2} \int_{V_A} |\mathbf{E}|^2 dV \right]}{\frac{1}{2} \int_{S_c} R_s |H_t|^2 dS + \omega_{r,mnp} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r''}{2} \int_{V_A} |\mathbf{E}|^2 dV} \quad (12)$$

onde o subscrito A em $Q_{A,mnp}$ indica fator de mérito da cavidade com a lâmina dielétrica. A presença do material dentro da cavidade afeta também suas frequências de ressonância. A frequência de ressonância no modo TE_{101} com a cavidade vazia é obtida pela expressão:

$$f_{r0(101)} = \frac{1}{2\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{d}\right)^2}. \quad (13)$$

A inclusão da lâmina dielétrica no centro da cavidade ($z = d/2$) provoca um deslocamento dessa frequência de ressonância para $f_{r\epsilon}$. Essa nova frequência pode ser determinada por um equacionamento de linhas de transmissão [1] em que as coordenadas $z = 0$ e $z = d/2$ correspondem a um curto e a um circuito aberto respectivamente, pois nessas posições o campo elétrico tem valor nulo e valor máximo, respectivamente, para o modo TE_{101} .

Assim, obtém-se

$$\frac{\cot \left(\sqrt{\omega_{r\epsilon}^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r' - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \frac{e}{2} \right)}{\left(\sqrt{\omega_{r\epsilon}^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r' - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \right)} = \frac{\tan \left(\sqrt{\omega_{r\epsilon}^2 \mu_0 \epsilon_0 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \frac{d-e}{2} \right)}{\left(\sqrt{\omega_{r\epsilon}^2 \mu_0 \epsilon_0 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \right)} \quad (14)$$

A resolução da equação 14 faz parte da formulação teórica aqui desenvolvida e foi implementada junto com o restante do modelo teórico no aplicativo *MathcadTM*. A frequência $f_{r\epsilon}$ é obtida por um processo iterativo, em que se determina a maior frequência $f_{r\epsilon}$ que satisfaça essa equação e tal que $f_{r\epsilon} < f_{r0}$ com uma precisão arbitrária Δf . Com o objetivo de obter resultados genéricos, as análises paramétricas foram efetuadas em três cavidades distintas, com as seguintes dimensões e frequências de ressonância no modo TE_{101} :

- cavidade 1: $a = 1$, $b = 2$, $c = 3$ (cm), $f_{r0(101)} = 9,008$ GHz;
- cavidade 2: $a = 10$, $b = 20$, $c = 30$ (cm), $f_{r0(101)} = 900,8$ MHz;
- cavidade 3: $a = 1$, $b = 2$, $c = 3$ (m), $f_{r0(101)} = 90,08$ MHz.

A variação dos parâmetros da lâmina de material dielétrico localizada no centro da cavidade foi especificada para acomodar as variações de frequência em cada caso:

- cavidade 1- espessuras do dielétrico: 1 mm, 2 mm e 4 mm;
- cavidade 2- espessuras do dielétrico: 1cm, 2 cm e 4 cm;
- cavidade 3- espessuras do dielétrico: 10 cm, 20 cm e 40 cm;
- $\epsilon_r' = 2,0$ e ϵ_r'' de 0 a 0,4 (tangente de perdas δ de 0 a 0,2 em todas as cavidades).

A figura 2 indica para as três cavidades os resultados obtidos para a variação do fator de mérito normalizado em relação ao fator de mérito da cavidade vazia.

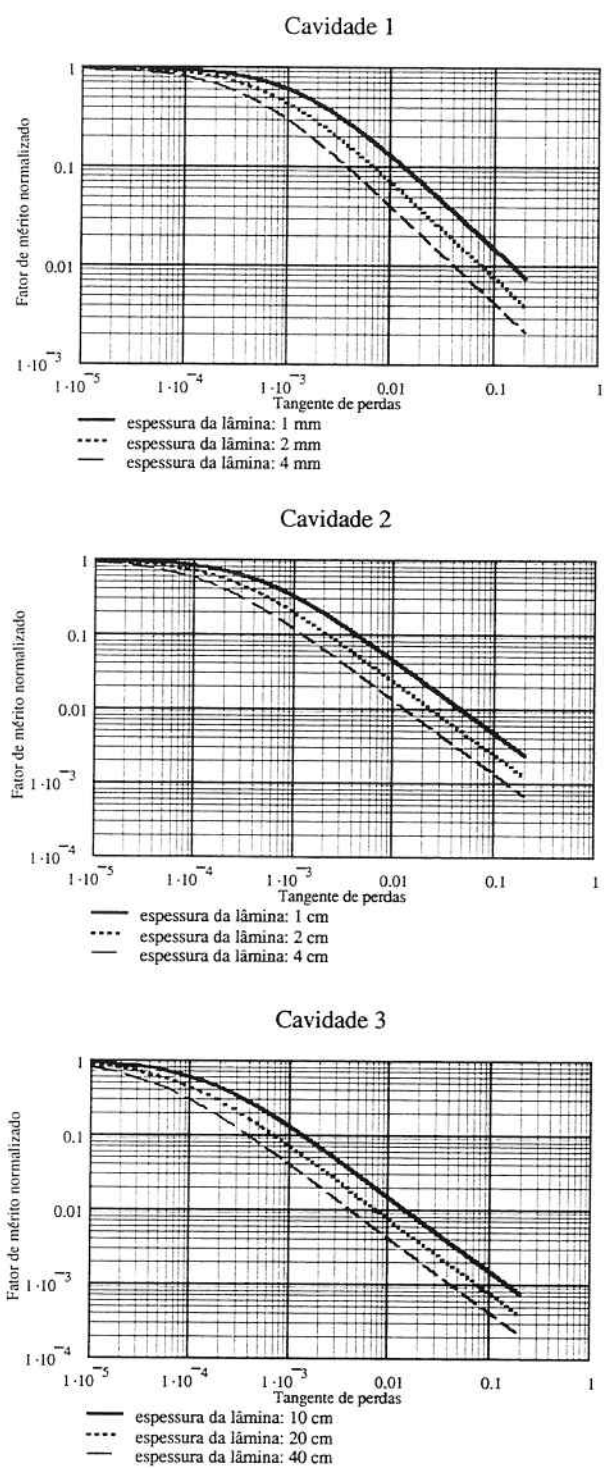


Figura 2: Gráficos paramétricos do fator de mérito normalizado nas 3 cavidades.

O modelo teórico pode ser estendido para outros modos de ressonância e para placas com abertura, neste caso, de forma aproximada.

3 Método computacional

O método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo - FDTD, primeiramente formulado por Yee [12], tem larga utilização na simulação de problemas de eletromagnetismo [14, 15], em especial na área de microondas [16].

3.1 Procedimento computacional

O problema proposto neste trabalho é de domínio fechado e as condições de contorno são as equivalentes às paredes metálicas da cavidade.

A discretização espacial e temporal aplicada às equações de Maxwell conduz a equações como exemplificadas:

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\mu_o \Delta} [E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k + 1) - E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k) + E_z^n(i, j, k + \frac{1}{2}) - E_z^n(i, j + 1, k + \frac{1}{2})] \quad (15)$$

$$E_x^{n+1}(i + \frac{1}{2}, j, k) = \left[1 - \frac{\sigma(i + \frac{1}{2}, j, k) \Delta t}{\epsilon(i + \frac{1}{2}, j, k)} \right] E_x^n(i + \frac{1}{2}, j, k) + \frac{\Delta t}{\epsilon(i + \frac{1}{2}, j, k) \Delta} \left[H_z^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k) + H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) \right] \quad (16)$$

Nas equações 15 e 16 foi considerado que $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$, ou seja, há uniformidade na discretização espacial. Quanto ao posicionamento, as componentes de campo elétrico e magnético estão deslocadas da seguinte forma:

- as componentes do campo elétrico são deslocadas de $\Delta/2$ no sentido e direção da própria componente, ou seja, como indicado na equação 16, $E_x(i, j, k)$ é calculado no ponto $(i + \frac{1}{2}, j, k)$;
- as componentes do campo magnético são deslocadas de $\Delta/2$ no sentido e direção das duas componentes ortogonais à componente do campo, como indicado na equação 15, ou seja, $H_x(i, j, k)$ é calculado no ponto $(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})$.

A exatidão do método está relacionada com a relação entre o incremento espacial Δ e o comprimento de onda no meio:

$$\Delta \leq \frac{\lambda_{d(min)}}{10}, \quad (17)$$

em que $\lambda_{d(min)}$ é o menor comprimento de onda, considerando todos os dielétricos. O comprimento de onda para um dielétrico qualquer é dado por [9]:

$$\lambda_d = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{\mu \epsilon'} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon'} \right)^2} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}}. \quad (18)$$

A estabilidade do método FDTD tem sido analisada na literatura por diversos autores, tendo sido apresentadas relações que estabelecem valores máximos para Δt em função da discretização espacial e da velocidade máxima na malha discretizada, supondo materiais com $\sigma = 0$.

Considerando que os materiais de interesse têm $\sigma > 0$, o método de Neumann [17] é aplicado à equação de atualização do campo elétrico, obtendo-se

$$\Delta t \leq \frac{\Delta^2 \mu \epsilon'}{8} \left[\sqrt{\left(\frac{\sigma_e}{\epsilon'}\right)^2 + \frac{16}{\Delta^2 \mu \epsilon'}} - \frac{\sigma_e}{\epsilon'} \right] \quad (19)$$

e

$$\Delta t \leq \frac{2}{\left[\frac{\sigma_e}{\epsilon'} + \frac{4}{\Delta \sqrt{\mu \epsilon'}} \right]}. \quad (20)$$

No código computacional implementado essas condições são verificadas ou impostas de acordo com critérios específicos.

3.2 Visualização Científica

Visualização é o processo de explorar, transformar e observar dados na forma de imagens (ou outras formas sensoriais) para obter um melhor entendimento e sensibilidade relacionados a esses dados [18]. Visualização científica é a aplicação desse processo a dados científicos. A implementação de módulos de visualização normalmente é relegada a um segundo plano por parte de pesquisadores no campo do eletromagnetismo, devido à dificuldade de desenvolvimento de tal ferramenta utilizando linguagens convencionais de programação [19]. Contudo, recursos avançados de visualização aplicados ao estudo de campos eletromagnéticos já estão sendo utilizados [20]. Com o objetivo de obter os benefícios da visualização científica foi utilizada no desenvolvimento do módulo de pós-processamento deste trabalho uma biblioteca específica para computação gráfica e visualização científica, o *Visualization Toolkit* - VTK. O VTK tem sido recentemente utilizado em vários ramos da ciência, como climatologia, geologia e medicina [21, 22]. Além da utilização direta dos recursos de visualização no sistema computacional aqui elaborado, estes foram utilizados com grande eficiência no processo de depuração do código computacional do módulo de processamento, devido à verificação inequívoca de consistência que uma imagem proporciona.

3.3 Estrutura do Método Computacional Desenvolvido

A figura 3 é um fluxograma do método computacional desenvolvido e indica os diferentes tipos de entrada e de saída de dados.

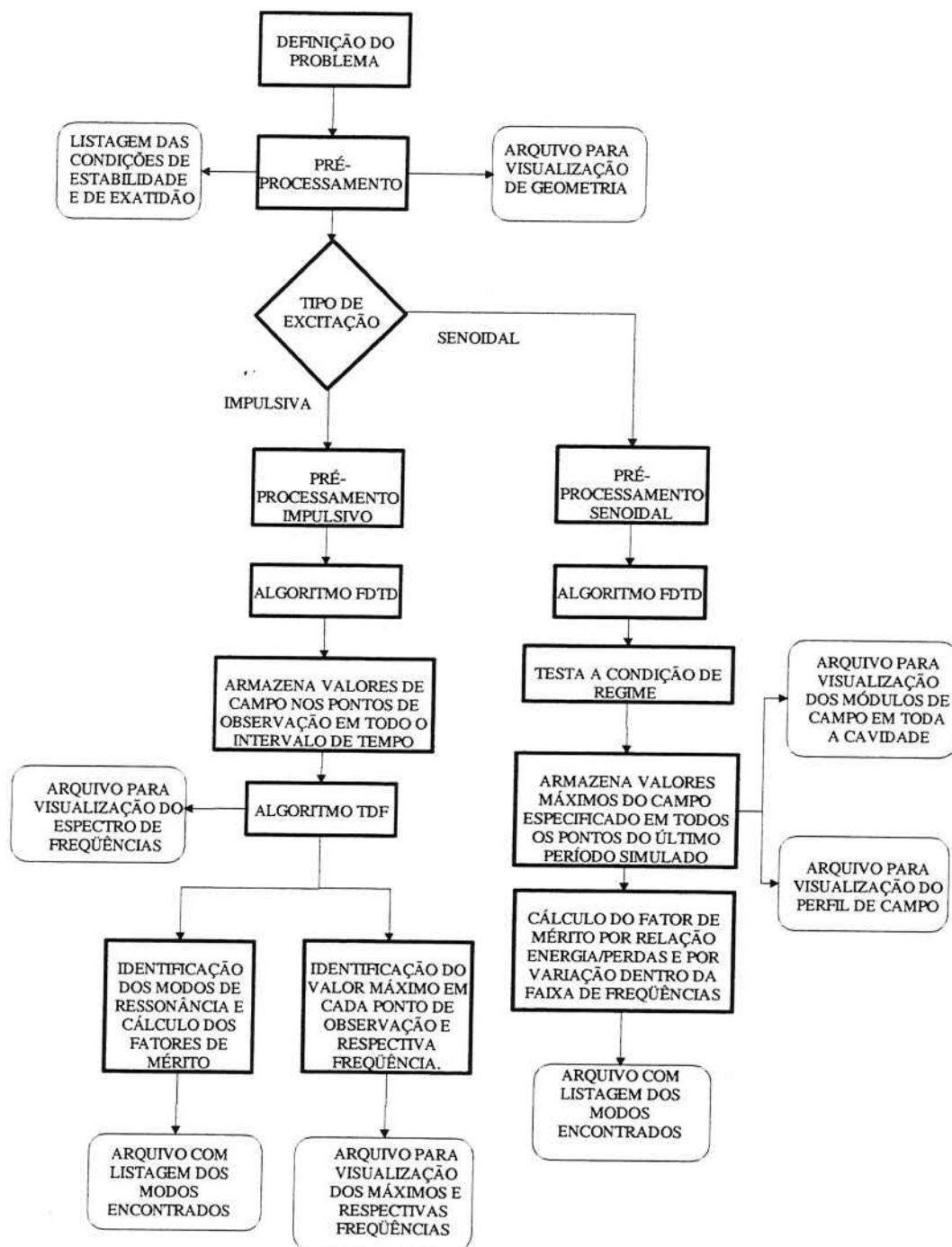


Figura 3: Fluxograma da simulação.

4 Resultados

Como exemplo, nesta seção o método computacional é utilizado para analisar a influência de parâmetros nas perdas em cargas dielétricas dentro de um forno industrial de microondas. A cavidade simulada têm as dimensões aproximadas de um dos fornos existentes no Laboratório de Microondas do Instituto Mauá de Tecnologia e está esquematizada na figura 4. A frequência de excitação é 2,45 GHz, a mesma utilizada no forno em questão e na grande maioria dos fornos industriais.

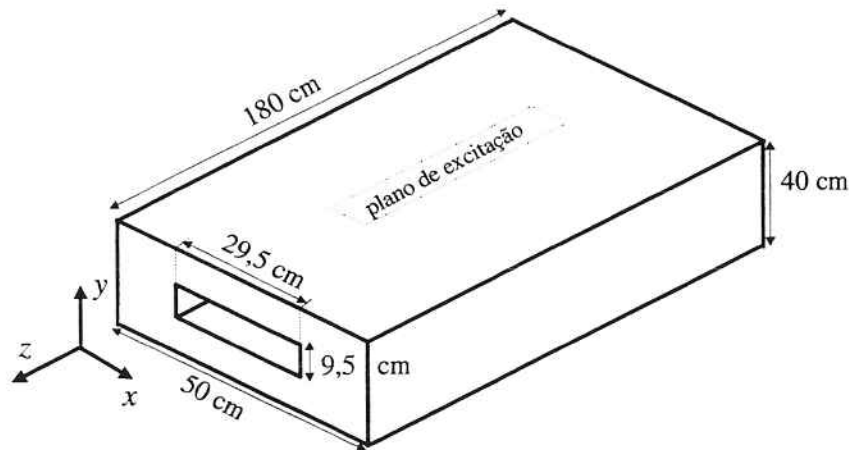


Figura 4: Dimensões da cavidade que representa o forno de microondas.

A limitação imposta à geometria das cargas dielétricas é que estas devem ter seção transversal (ao sentido de deslocamento na esteira) menor que a entrada de alimentação que é de $9,5 \times 29,5$ cm. A carga dielétrica é aquecida durante sua passagem pelo interior do forno. As cargas consideradas aqui são blocos dielétricos que atravessam o forno real através do movimento da esteira. Para simular o efeito desse movimento nas simulações, será considerada como parâmetro de comparação a soma das perdas em todos os blocos, ou seja, um valor proporcional à média das perdas em todas as posições que um determinado bloco ocuparia.

O material dielétrico utilizado na análise é a madeira (pinho), a qual pode sofrer um aquecimento ou secagem através de microondas. As características dielétricas desse material dependem do seu grau de umidade. Para a temperatura de 20° C , frequência de 2,45 GHz e grau de umidade de 20% as constantes dielétricas do pinho são

$$\epsilon'_r = 5,0$$

$$\epsilon''_r = 1,35, \text{ o que, para } f = 2,45\text{GHz, implica } \sigma_e = 0,184 \text{ S/m.}$$

A partir desses dados, determinou-se $\Delta = 1$ cm como adequado para as simulações. A fonte de RF do forno de microondas real é acoplada através de 12 guias de onda, em três conjuntos de 4 guias. Nas simulações essa excitação foi simplificada por um plano situado na parte “superior” da cavidade a 1 cm da respectiva parede), conforme indicado na figura 4, e localizado na mesma parte da cavidade que os guias correspondentes no forno real.

A carga dielétrica será composta por blocos de pinho, com dimensões $8 \times 8 \times 28$ cm, dispostos de formas diversas dentro da cavidade, conforme indicado a seguir. Em uma primeira etapa, será

verificada a influência da orientação dos blocos dentro da cavidade, mantendo-se a quantidade total de madeira constante dentro da cavidade. A figura 5 é uma vista superior esquemática das configurações dos blocos de madeira que são utilizadas nas simulações. Em todas elas, os blocos têm as dimensões citadas anteriormente. Nas configurações A, B e C há 18 blocos e na configuração D há 9 blocos.

Devido à posição dos guias de onda no forno real, há duas possibilidades de polarização para o campo elétrico, E_x e E_z . Combinando essas duas polarizações com as configurações geométricas A, B e C obtém-se 6 possibilidades diferentes, cuja descrição e resultados encontram-se na tabela 1, indicadas como simulações de número 1 a 6.

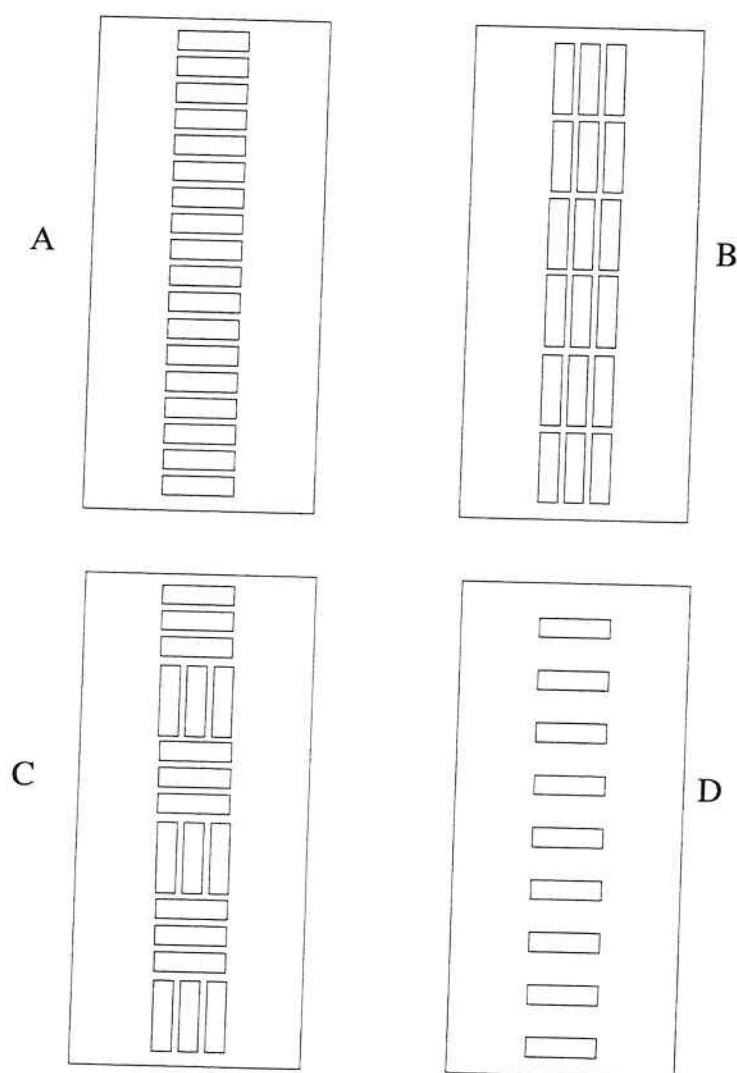


Figura 5: Diferentes configurações para o material dielétrico dentro da cavidade.

Tabela 1: Perdas no material dielétrico na cavidade do forno.

simulação	configuração geométrica	polarização do campo de excitação	extensão da fonte no sentido z [cm]	Perda normalizada em relação à simulação 1	Q
1	A	Ex	90	1,00	35
2	A	Ez	90	0,84	30
3	B	Ex	90	1,01	36
4	B	Ez	90	0,79	33
5	C	Ex	90	1,00	35
6	C	Ez	90	0,82	31
7	A	Ex	170	0,97	42
8	A	Ez	170	0,96	33
9	A com metade dos blocos	Ex	170	0,86	60
10	A com metade dos blocos	Ez	170	1,52	46

Os resultados das simulações 1 a 6 são bem próximos, podendo-se concluir que a configuração geométrica dos blocos não tem influência nesse caso em que todo o espaço disponível no forno foi utilizado. A excitação segundo E_x é mais eficiente em todas as configurações, A, B ou C. As distribuições de campo elétrico de algumas das simulações indicadas na tabela 1 são analisadas a seguir.

Nas figuras 6 e 7 pode-se observar a distribuição de campo para o plano $y = 10$ cm com excitação E_x e E_z respectivamente. Esse plano situa-se aproximadamente no “centro” dos blocos e é nítida a diferença de concentração dos campos para as duas excitações. A excitação E_x proporciona campos máximos no interior dos blocos, ao contrário da excitação E_z , em que os máximos de campo ocorrem fora dos blocos. Em contrapartida, a intensidade máxima para excitação E_z é maior, mas não o suficiente para compensar o efeito de maior concentração da outra excitação. Outra informação importante obtida através das figuras 6 e 7 é que o campo praticamente não se propaga além da região da fonte de excitação, pois as áreas em azul dominam as extremidades do forno. Conclui-se, portanto, que a fonte de excitação deve ser distribuída o mais uniforme possível ao longo da direção z . Para verificar esse efeito, foram efetuadas simulações com o plano da fonte mais extenso no sentido de z , mantendo contudo a mesma área total para que a energia total injetada no sistema durante a simulação seja a mesma (simulações 7 e 8 da tabela 1).

Pelos resultados obtidos, também indicados na tabela 1, não houve um aumento das perdas para a excitação E_x , mas isso ocorreu para excitação E_z , o que sugere que foi obtida uma maior uniformidade com a mudança do plano de excitação. Novamente analisando a distribuição dos campos através das figuras 8 e 9, pode-se observar o efeito esperado de maior uniformidade de campo com a mudança do plano da fonte, para excitação E_z , o que resultou em uma perda maior.

Uma última investigação foi feita no sentido da influência da quantidade de material dielétrico dentro do forno. Para isso, as simulações com configuração geométrica A foram refeitas utilizando a configuração D, com metade dos blocos, retirando-se alternadamente blocos da configuração A. A partir dos dados da tabela 1 (simulações 9 e 10) verifica-se que para excitação E_z foi obtida uma perda em torno de 50% maior que o máximo obtido anteriormente. A visualização da distribuição do campo E_z dentro da cavidade permite confirmar as maiores intensidades de campo nos blocos no segundo caso. A cavidade parcialmente preenchida foi mais eficiente quanto à energia total depositada, mas do ponto de vista de um processo industrial, metade dos blocos são processados em um

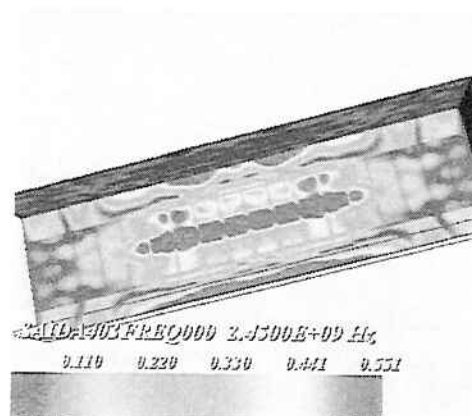


Figura 6: Visualização da distribuição do campo elétrico E_x no plano $y = 10$ cm da cavidade do forno.

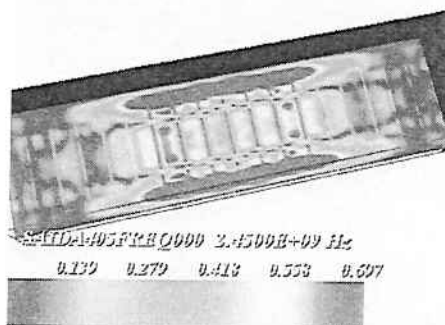


Figura 7: Visualização da distribuição do campo elétrico E_z no plano $y = 10$ cm da cavidade do forno.

mesmo tempo nesse caso. Esse resultado parece justificar a prática usual de preencher totalmente a cavidade para obter um melhor rendimento do processo. Contudo, em situações específicas, onde uma maior deposição de energia por unidade de volume for necessária, o espaçamento entre as unidades de material dielétrico pode ser vantajoso.

As análises aqui realizadas restringiram-se à variação da perda no material dielétrico, sem levar em conta aspectos importantes do aquecimento, com a variação da constante dielétrica com a temperatura e com o grau de umidade. Uma análise completa envolvendo tais variáveis não é o escopo desse trabalho.

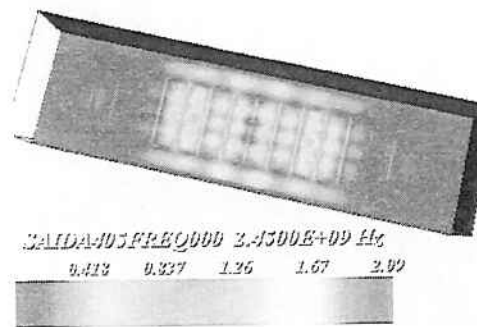


Figura 8: Visualização da distribuição do campo elétrico E_z no plano $y = 8$ cm da cavidade do forno com a fonte menos extensa.

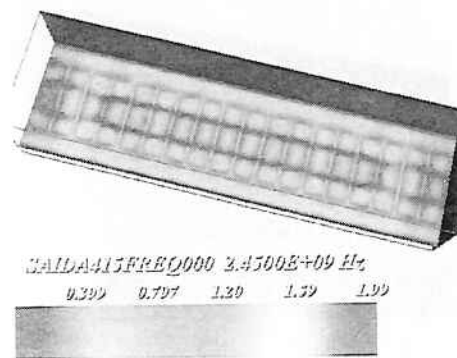


Figura 9: Visualização da distribuição do campo elétrico E_z no plano $y = 8$ cm da cavidade do forno com a fonte mais extensa.

5 Conclusões

A presença de corpos dielétricos com perdas no interior de cavidades ressonantes representa um problema que pode existir em diversas situações de interesse nos campos de engenharia de microondas e de telecomunicações. Esse problema tem sido estudado em casos específicos através de várias formulações analíticas, simulações numéricas e investigações experimentais, não havendo, entretanto, uma análise genérica de natureza mais completa, incluindo uma formulação analítica e um estudo paramétrico. Tal análise deve permitir um conhecimento mais sistemático da alteração dos campos eletromagnéticos dentro da cavidade com a presença do(s) corpo(s) dielétrico(s) e, com isso, possibilitar o projeto e a interpretação de resultados nas situações relacionadas a esse problema genérico.

Neste trabalho foram desenvolvidos uma formulação analítica e um método computacional eficiente para a análise do problema. A formulação analítica foi desenvolvida a partir de procedimentos de determinação de constante dielétrica, sendo realizada a adaptação para que a frequência de ressonância e o fator de mérito sejam determinados a partir dos parâmetros de corpos dielétricos com geometrias simples. A partir desse modelo analítico, foram geradas curvas paramétricas que indicam a variação do fator de mérito para três diferentes cavidades que cobrem uma ampla faixa

de frequências de utilização.

O método computacional é adequado para a análise quanto à variação de parâmetros do problema, como constante dielétrica, tangente de perdas, frequência e tipo de excitação, dimensões da cavidade e do corpo dielétrico, entre outros. O conjunto dos modelos desenvolvidos permite uma análise paramétrica ampla do problema, criando um conhecimento sistemático do fenômeno. Para apoio à análise, foram implementadas ferramentas de visualização dos resultados utilizando recursos de computação gráfica.

O modelo computacional desenvolvido pode ser aplicado a problemas de interesse da engenharia de microondas e da compatibilidade eletromagnética, como forma de estabelecer um conhecimento básico da alteração dos campos dentro de uma cavidade com a presença de corpos dielétricos. Foi comprovado que modos específicos dentro de uma faixa de frequências podem ser atenuados e ter seu fator de mérito reduzido segundo um fator qualquer pelo uso de placas dielétricas finas. A redução dos fatores de mérito de todos os modos dentro de uma determinada faixa de frequência também pode ser obtida com o uso de outras geometrias para os corpos dielétricos. Além da resposta da cavidade no domínio da frequência, a distribuição dos campos elétrico e magnético pode ser investigada em função da geometria e posição de corpos dielétricos.

A contribuição do trabalho pode ser resumida, portanto, à previsão da perturbação dos campos eletromagnéticos dentro de uma cavidade retangular genérica considerando parâmetros de um ou mais corpos dielétricos (com ou sem perdas) dispostos em seu interior. Essa previsão pode ser orientada segundo características desejadas no domínio da frequência ou no domínio do tempo. Sabendo prever o comportamento do campo e tendo-se uma adequada visualização de sua distribuição, pode-se "projetar" de uma forma iterativa o corpo e/ou sua posição para obter os resultados desejados quanto à configuração de campos no interior da cavidade em diversas situações de interesse prático.

A partir de resultados deste trabalho, com alterações convenientes no modelo computacional desenvolvido, podem ser realizados alguns estudos específicos, como elaboração de um modelo aplicado ao aquecimento de materiais em microondas, adequação de câmaras blindadas a ensaios de compatibilidade eletromagnética e estudo de materiais magnéticos em cavidades.

Referências

- [1] SUCHER, M.; FOX, J. **Handbook of Microwave Measurements**. Ephrata: Polytechnic Press, 1963. v.2.
- [2] LI, D. et al. A simple method for accurate loss tangent measurement using a microwave resonant cavity. **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**, v.11, n.3, p.118-20, 2001.
- [3] THAKUR, K.P.; HOLMES, W.S. Dielectric constant and loss factor of dielectric material using finite element method in a cavity. In: ASIA-PACIFIC MICROWAVE CONFERENCE, 2000. p.432-6.
- [4] PAOLONI, F. Calculation of power deposition in a highly overmoded rectangular cavity with dielectric loss. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, v.24, n.1, p.21-31.
- [5] MONSORIU, J.A. et al. Analysis of dielectric-loaded cavities using an orthonormal-basis method. **IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques**, v.50, n.11, p. 2545-51, 2002.
- [6] MILOVANOVIĆ, B.; STANKOVIĆ, Z.; IVKOVIĆ, S. Loaded cylindrical metallic cavities modeling using neural networks. In: TELSIS' 99 - 4th TELECOMMUNICATIONS IN MODERN SATELLITE, CABLE AND BROADCASTING SERVICES, Niš, 1999. **Proceedings**. v.1, p.214-7.
- [7] IZZAT, N. Analysis and realisation of low-cost damped screened rooms. **IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.**, v.145, n.1, p.1-7, 1998.

- [8] IZZAT, N. et al. Use of resistive sheets in damping cavity resonance. **Electronic Letters**, v.32, n.8, p.721-2, 1996.
- [9] BALANIS, C.A. **Advanced Engineering Electromagnetics**. New York, Wiley, 1990.
- [10] TENORIO, E.; PASCHOALATI, P.R.; MOTTA, C.C. A solution of rectangular ridged waveguide using the finite element method. In: ITS'02 - INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION SYMPOSIUM, 2002. **Proceedings**.
- [11] POUZADA, E. V. S.; JANISZEWSKI, J. M. Ridged waveguides: analysis by the boundary element method. In: IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROONDAS E OPTOELETRÔNICA, João Pessoa, 2000. **Anais**.
- [12] YEE, K.S. Numerical solutions of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. **IEEE Trans. on Antennas and Propagation**, v.14, n.5, p.302-7, 1966.
- [13] KUNZ, K.S. **Finite difference time domain method for electromagnetics**. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- [14] RAILTON, C.J. et al. The analysis of medium-sized arrays of complex elements using a combination of FDTD and reaction matching. **IEEE Trans. on Antennas and Propagation**, v.47, n.4, p.707-14, 1999.
- [15] MARTINEZ-BURDALO, M. et al. Using a combination of FDTD with a surface integration method for electromagnetic scattering analysis in large regions. **Microwave and Optical Technology Letters**, v.22, n.1, p.74-8, 1999.
- [16] KANAI, W. et al. Resonant frequency analysis of reentrant resonant cavity applicator by using FEM and FD-TD method. **IEEE Trans. on Magnetism**, v.36, n.4, p.1750-3, 2000.
- [17] SEWELL, G. **The numerical solution of ordinary and partial differential equations**. San Diego: Academic Press, 1988.
- [18] SCHRONDER, W.; MARTIN, H.; LORENSEN, B. **The visualization toolkit: an object-oriented approach to 3-D graphics**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997.
- [19] PAVÃO, A.C.; POUZADA, E.V.S.; MATHIAS, M.A. Electromagnetic field visualization through VTK software. In: INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE, Belém, 2001. **Proceedings**. p.21-4.
- [20] BARTSCH, M. et al. Advanced electromagnetic field visualization using the virtual reality modeling language standard. **IEEE Trans. on Magnetism**, v.37, n.5, p. 3604-7, 2001.
- [21] DRAKE, D. Determination of unknown particle charges in a thunder cloud based upon detected electric field vectors. In: VISUALIZATION, New York, 1997. **Proceedings**. p. 479-82.
- [22] BASSO, K.; DAL SASSO FREITAS, C.M. Visualization of geological prospecting data. In: SIBGRAPI'98 - INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTER GRAPHICS, IMAGE PROCESSING AND VISION, Los Alamitos, 1998. **Proceedings**. p.142-9.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PTC/9901 – Avaliação de Ergoespirômetros Segundo a Norma NBR IEC 601-1- MARIA RUTH C. R. LEITE, JOSÉ CARLOS TEIXEIRA DE B. MORAES
- BT/PTC/9902 – Sistemas de Criptofonia de Voz com Mapas Caóticos e Redes Neurais Artificiais – MIGUEL ANTONIO FERNANDES SOLER, EUVALDO FERREIRA CABRAL JR.
- BT/PTC/9903 – Regulação Sincronizada de Distúrbios Senodais – VAIDYA INÉS CARRILLO SEGURA, PAULO SÉRGIO PEREIRA DA SILVA
- BT/PTC/9904 – Desenvolvimento e Implementação de Algoritmo Computacional para Garantir um Determinado Nível de Letalidade Acumulada para Microorganismos Presentes em Alimentos Industrializados – RUBENS GEDRAITE, CLÁUDIO GARCIA
- BT/PTC/9905 - Modelo Operacional de Gestão de Qualidade em Laboratórios de Ensaio e Calibração de Equipamentos Eletromédicos – MANUEL ANTONIO TAPIA LÓPEZ, JOSÉ CARLOS TEIXEIRA DE BARROS MORAES
- BT/PTC/9906 – Extração de Componentes Principais de Sinais Cerebrais Usando Karhunen – Loève Neural Network – EDUARDO AKIRA KINTO, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PTC/9907 – Observador Pseudo-Derivativo de Kalman Numa Coluna de Destilação Binária – JOSÉ HERNANDEZ LÓPEZ, JOSÉ JAIME DA CRUZ, CLAUDIO GARCIA
- BT/PTC/9908 – Reconhecimento Automático do Locutor com Coeficientes Mel-Cepstrais e Redes Neurais Artificiais – ANDRÉ BORDIN MAGNI, EUVALDO F. CABRAL JÚNIOR
- BT/PTC/9909 – Análise de Estabilidade e Síntese de Sistemas Híbridos – DIEGO COLÓN, FELIPE MIGUEL PAIT
- BT/PTC/0001 – Alguns Aspectos de Visão Multiescalas e Multiresolução – JOÃO E. KOGLER JR., MARCIO RILLO
- BT/PTC/0002 – Placa de Sinalização E1: Sinalização de Linha R2 Digital Sinalização entre Registradores MFC- PHILLIP MARK SEYMOUR BURT, FERNANDA CARDOSO DA SILVA
- BT/PTC/0003 – Estudo da Técnica de Comunicação FO-CDMA em Redes de Fibra Óptica de Alta Velocidade – TULIPA PERSO, JOSÉ ROBERTO DE A. AMAZONAS
- BT/PTC/0004 – Avaliação de Modelos Matemáticos para Motoneurônios – DANIEL GUSTAVO GOROSO, ANDRÉ FÁBIO KOHN
- BT/PTC/0005 – Extração e Avaliação de Atributos do Eletrocardiograma para Classificação de Batimentos Cardíacos – ELDER VIEIRA COSTA, JOSÉ CARLOS T. DE BARROS MORAES
- BT/PTC/0006 – Uma Técnica de Imposição de Zeros para Auxílio em Projeto de Sistemas de Controle – PAULO SÉRGIO PIERRI, ROBERTO MOURA SALES
- BT/PTC/0007 – A Connected Multireticulated Diagram Viewer – PAULO EDUARDO PILON, EUVALDO F. CABRAL JÚNIOR
- BT/PTC/0008 – Some Geometric Properties of the Dynamic Extension Algorithm – PAULO SÉRGIO PEREIRA DA SILVA
- BT/PTC/0009 – Comparison of Alternatives for Capacity Increase in Multiple-Rate Dual-Class DS/CDMA Systems – CYRO SACARANO HESI, PAUL ETIENNE JESZENSKY
- BT/PTC/0010 – Reconhecimento Automático de Ações Faciais usando FACS e Redes Neurais Artificiais – ALEXANDRE TORNICE, EUVALDO F. CABRAL JÚNIOR
- BT/PTC/0011 – Estudo de Caso: Tornando um Projeto Testável Utilizando Ferramentas Synopsys – REINALDO SILVEIRA, JOSÉ ROBERTO A. AMAZONAS
- BT/PTC/0012 – Modelos Probabilísticos para Rastreamento em Carteiras de Investimento – HUGO G. V. DE ASSUNÇÃO, OSWALDO L. V. COSTA
- BT/PTC/0013 – Influência de um Controle Imperfeito de Potência e Monitoramento da Atividade Vocal na Capacidade de Sistemas DS/CDMA – MÁRCIO WAGNER DUARTE ROLIM, PAUL JEAN ETIENNE JESZENSKY
- BT/PTC/0014 – Canceladores de Interferência Sucessivo e Paralelo para DS/CDMA – TAUFIK ABRÃO, PAUL JEAN E. JESZENSKY
- BT/PTC/0015 – Transmissão de Serviços de Multimídia num Sistema Móvel Celular CDMA de Banda Larga – EDUARDO MEIRELLES MASSAUD, PAUL JEAN ETIENNE JESZENSKY
- BT/PTC/0016 – Disseminação do HIV em uma População Homossexual Heterogênea – MARCOS CASADO CASTÑO, JOSÉ ROBERTO CASTILHO PIQUEIRA
- BT/PTC/0017 – Implementação e Avaliação em Laboratório de um Monitor Cardíaco Portátil para Três Derivações – RAISA FERNÁNDEZ NUNEZ, JOSE CARLOS TEIXEIRA DE BAROS MORAES
- BT/PTC/0018 – Projeto de Filtros Recursivos de N-ésima Banda – IRINEU ANTUNES JÚNIOR, MAX GERKEN
- BT/PTC/0019 – Relative Flatness and Flatness of Implicit Systems – PAULO SÉRGIO PEREIRA DA SILVA, CARLOS CORRÊA FILHO
- BT/PTC/0020 – Estimativa de Fluxo Sangüíneo nas Artérias Coronárias Usando Imagens de Cineangiocardiorrafia – ANA CRISTINA DOS SANTOS, SÉRGIO SHIGUEMI FURUIE
- BT/PTC/0021 – Modelos Populacionais para AIDS e Análise do Equilíbrio sem Epidemia – ELIZABETH FERREIRA SANTOS, JOSÉ ROBERTO CASTILHO PIQUEIRA

- BT/PTC/0101 – Model-Based Soft-Sensor Design for On-Line Estimation of the Biological Activity in Activated Sludge Wastewater Treatment Plants – OSCAR A. Z. SOTOMAYOR, SONG WON PARK, CLAUDIO GARCIA
- BT/PTC/0102 – Reconhecimento Automático do Locutor Utilizando a Rede Neural Artificial *Field Distributed Memory* – FDM – MARCELO BLANCO, EUVALDO F. CABRAL JR.
- BT/PTC/0103 – Algoritmos de Filtragem e Previsão em Modelos de Volatilidade – FERNANDO LOVISOTTO, OSWALDO L. V. COSTA
- BT/PTC/0104 – Método de Diferenças Temporais Aplicado às Equações de Riccati Acopladas entre Si – OSWALDO L. V. COSTA, JULIO C. C. AYA
- BT/PTC/0105 – Método de Diferenças Finitas e de Monte Carlo em Derivativos – ANDRÉ CURY MAIALI, OSWALDO LUIZ DO VALLE COSTA
- BT/PTC/0106 – Resolução de um Problema Inverso de Eletromagnetismo por Meio de Redes Neurais Artificiais – ARNALDO MEGRICH, JORGE MIECZYSLAW JANISZEWSKI
- BT/PTC/0107 – Projeto de Controlador de Temperatura para Perfusão Peritoneal com Hipertermia e Quimioterapia – GIANCARLO ANTONIO BERZACOLA, FUAD KASSAB JÚNIOR
- BT/PTC/0108 – O Papel de Diferentes Grupos Popacionais na Transmissão Sexual do HIV – ELIZABETH FERREIRA SANTOS, JOSÉ ROBERTO CASTILHO PIQUEIRA
- BT/PTC/0109 – Terapias Ótimas Anti-HIV para a Redução da Transmissão Vertical – RENATO BEVILACQUA, LUIZ HENRIQUE ALVES MONTEIRO
- BT/PTC/0110 – Brain Signal Analysis Using Non-Linear ARIMA Models – ERNANE J. X. COSTA, EUVALDO FERREIRA CABRAL JR.
- BT/PTC/0111 – Cancelamento de Eco Acústico Estéreo: Análise de Algoritmos Adaptativos e um novo Método de Redução do Desalinhamento – ROBERTO ROSCHEL BELLI, PHILLIP MARK SEYMOUR BURT
- BT/PTC/0112 – Natural Gas Flow Computer With Open Architecture Using Intelligent Instrumentation And Field Bus – OSMEL REYES VAILLANT, CLAUDIO GARCIA
- BT/PTC/0113 – Aplicação de Métodos de Inteligência Artificial em Inteligência de Negócios – ROGÉRIO GARCIA DUTRA, EUVALDO FERREIRA CABRAL JR.
- BT/PTC/0114 – Detectores Multiusuário para DS/CDMA – Canceladores de Interferência – TAUFIK ABRÃO, PAUL JEAN E. JESZENSKY
- BT/PTC/0115 – Reconhecimento Automático do Locutor Usando Pré-Processamento em Sons Nasalizados com Diversos Classificadores Neurais – ROBERTO AMILTON BERNARDES SÓRIA, EUVALDO FERREIRA CABRAL JR.
- BT/PTC/0116 – Aplicando a Técnica de Times Assíncronos na Otimização de Problemas de Empacotamento Unidimensional – REINALDO DE BERNARDI, TSEN CHUNG KANG
- BT/PTC/0117 – A Simplified Implementation of the Theory of Emotions for Emotots – RODRIGO DE TOLEDO CAROPRESO, RODRIGO DIAS MORGADO, EUVALDO FERREIRA CABRAL JR.
- BT/PTC/0118 – Modelos Dinâmicos Aplicados à Propagação de Vírus em Redes de Computadores – BETYNA FERNÁNDEZ NAVARRO, JOSÉ ROBERTO CASTILHO PIQUEIRA
- BT/PTC/0119 – Técnicas para Melhorar o Desempenho do Método dos Análogos Modificado em Predição de Séries Temporais Caóticas – LUIZ MONZÓN BENITEZ, ADEMAR FERREIRA
- BT/PTC/0120 – Um Modelo Microscópico para a Simulação de uma Intersecção Semaforizada – EDUARDO ULI NELLAR, ADEMAR FERREIRA
- BT/PTC/0121 – Subspace Identification Methods Applied to Activated Sludge Processes: A Performance Comparison Study – OSCAR A. Z. SOTOMAYOR, SONG WON PARK, CLAUDIO GARCIA
- BT/PTC/0122 – Controle Avançado de Temperatura para Perfusão Peritoneal com Hipertermia e Quimioterapia - ARNALDO LAGANARO JÚNIOR, FUAD KASSAB JÚNIOR
- BT/PTC/0123 – Análise de Sinais Biológicos Utilizando *Wavelets* – FRANCO BELTRAME RUNZA, FUAD KASSAB JÚNIOR
- BT/PTC/0123 – Certificação de Estimuladores Neuromusculares no Sistema Brasileiro de Certificação de Equipamentos Médicos – EDUARDO RODRIGUES MANDL, JOSÉ CARLOS TEIXEIRA DE BARROS
- BT/PTC/0201 – Aplicação de Transformadas Tempo – Frequência e de Redes Neurais Artificiais no Processamento Digital de Sinais Cerebrais – MARCOS TEIXEIRA DE FREITAS FILHO, EUVALDO FERREIRA CABRAL JR.
- BT/PTC/0202 – Aspectos de Identificação para Controle de Sistemas NARX usando Redes Neurais RBF – RITA DE CÁSSIA PAVANI LAMAS, ADEMAR FERREIRA
- BT/PTC/0203 – A Equação de Riccati Estacionária na Estimação Linear em Sistemas Lineares Discretos no Tempo com Saltos Markovianos – SUSSET GUERRA JIMENEZ, OSWALDO LUIZ DO VALLE COSTA
- BT/PTC/0204 – Comparação entre Algoritmos de Identificação Não-Assistida de Canais de Comunicação Baseados em Estatísticas de Segunda Ordem – CLÁUDIO JOSÉ BORDIN JÚNIOR, LUIZ ANTONIO BACCALA
- BT/PTC/0205 – Desenvolvimento de um Simulador de uma Sub-Rede da Medula Espinhal – ROGÉRIO RODRIGUES LIMA CISI, ANDRÉ FABIO KOHN
- BT/PTC/0206 – Novos Modelos de Motoneurônios de Vertebrados – MARCOS FRAGA VIEIRA, ANDRÉ FABIO KOHN

- BT/PTC/0207 – Modelagem Auto-Regressiva e Memórias Associativas na Classificação de Sinais Eletromiográficos de Agulhas – IARA KAZUYO IKE, CINTHIA ITIKI
- BT/PTC/0208 – Análise da Classificação e da Síntese de Expressões Faciais com Redes Neurais Artificiais – OLIMPO MURILO CAPELI, EUVALDO FERREIRA CABRAL JUNIOR
- BT/PTC/0209 – Guiagem Automática de um Veículo Autônomo Baseada em Sistema de Visão – NICOLÁS CÉSAR LAVINIA, JOSÉ JAIME DA CRUZ
- BT/PTC/0210 – Some Geometric Properties of Differential-Algebraic Equations – PAULO SÉRGIO PEREIRA DA SILVA, CARLOS JUTTI WATANABE
- BT/PTC/0211 – Modelos de Média-Variância de Período Simples e Multi-Períodos na Análise de Carteiras de Investimento – MARGARETH AP. DE SOUZA BUENO, OSWALDO LUIZ DO VALLE COSTA
- BT/PTC/0212 – Avaliação da Utilização de Centrais Públicas de Informações de Crédito num Modelo de Previsão para Risco de Crédito – GUILHERME GONZALEZ C. PARENTE, OSWALDO LUIZ DO VALLE COSTA
- BT/PTC/0213 – Propagação de Erros de Frequência em Redes Mestre Escravo em Estrela Dupla – SANTOS ANDRÉS CASTILHO VARGAS, JOSÉ ROBERTO CASTILHO PIQUEIRA
- BT/PTC/0214 – Avaliação Prática de um Algoritmo de Alta Resolução na Determinação de Frequências de Ressonância em Estruturas de Grande Porte – LUIZ ANTONIO BARBOSA COELHO, LUIZ ANTONIO BACCALÀ
- BT/PTC/0301 – Finite Horizon Quadratic Optimal Control Problem of Markovian Jump Linear Systems With Partial Information – ESTEBAN FERNANDEZ TUESTA, OSWALDO LUIZ DO VALLE COSTA
- BT/PTC/0302 – A Framework for Admission Control Based on Aggregate Traffic Measurements and Network Characterization – ALEXANDRE BARBOSA DE LIMA, JOSE ROBERTO DE ALMEIDA AMAZONAS
- BT/PTC/0303 – Identificação Nebulosa da Concentração de Oxigênio Dissolvido do Tanque de Aeração de uma Estação de Tratamento de Esgotos por Lodos Ativados – ALEXANDRE MAGNO PARENTE DA ROCHA, CLAUDIO GARCIA
- BT/PTC/0304 – Cálculo de Balanço de Potência em Sistemas DWDM com Spans Variáveis e Amplificadores com Curva de Ganho não Plana – WALMARA DE PAULA HERMAN, JOSÉ ROBERTO DE ALMEIDA AMAZONAS
- BT/PTC/0305 – Robust Model Tracking and 2-D Control Design – FABRIZIO LEONARDI, JOSÉ JAIME DA CRUZ
- BT/PTC/0306 – Classificação de Ações do Mercado Financeiro Utilizando Técnicas Fuzzy –RENATO APARECIDO AGUIAR, ROBERTO MOURA SALES
- BT/PTC/0307 – Esquemas de Multitaxa para Sistemas CDMA de Banda Larga – ANDRÉ FAGUNDES DA ROCHA, PAUL JEAN ETIENNE JESZENSKY
- BT/PTC/0308 – A Time-Invariant Flat System Always Admits a Time-Invariant Flat Output – PAULO SERGIO PEREIRA DA SILVA, PIERRE ROUCHON
- BT/PTC/0309 – Otimização Robusta de Carteiras Utilizando Desigualdades Matriciais Lineares – RODRIGO BARROS NABHOLZ, OSWALDO LUIZ DO VALLE COSTA
- BT/PTC/0310 – Desenvolvimento de um Controlador Automático para Sistemas de Guiagem de Tiras de Aço em Linhas de Processos Siderúrgicos – AMAURI DIAS DE CARVALHO, JOSÉ JAIME DA CRUZ
- BT/PTC/0311 – Sincronismo em Redes Mestre-Escravo de Via Única: Estrela Simples, Cadeia Simples e Mista – CARLOS NEHEMY MARMO, JOSÉ ROBERTO CASTILHO PIQUEIRA
- BT/PTC/0312 – Aprendizado por Reforço Aplicado a Sistemas Neuro-Difusos para o Controle de Sinais de Trânsito - LEONCIO ZÁRATE GAMARRA, ADEMAR FERREIRA
- BT/PTC/0313 – Métodos de Decomposição em Problemas de Estoque e Roteirização – PATRÍCIA PRADO BELFIORE, OSWALDO LUIZ DO VALLE COSTA
- BT/PTC/0314 – Reconhecimento do Sinal Mielétrico Aplicado à Engenharia de Reabilitação – LEONARDO PINHEIRO DA SILVA, FUAD KASSAB JR.
- BT/PTC/0401 – Comparação Entre Receptores Espaço-Temporais Semicegos de Formatação de Feixe e Diversidade para SistemaS W-CDMA – IVAN ROBERTO SANTANA CASELLA, PAUL JEAN ETIENNE JESZENSKY
- BT/PTC/0402 – Mapas Acoplado e Aplicações: Processamento de Imagens, Auto-Organização e Processamento Simbólico – ROGÉRIO DE OLIVEIRA, LUIZ HENRIQUE ALVES MONTEIRO
- BT/PTC/0403 – Modelagem de FCC Usando Métodos de Identificação por Predição de Erro e por Sub-Espaços – SANTOS DEMETRIO MIRANDA BORJAS, CLAUDIO GARCIA
- BT/PTC/0404 – Implementação em Hardware / Firmware de um Sensor Virtual Utilizando Algoritmos de Identificação Fuzzy – CASSIO DE CARVALHO BERNI, CLAUDIO GARCIA
- BT/PTC/0405 – Técnicas de Seleção de Variáveis de Entrada para Identificação da Concentração de Amônia de uma Planta de Tratamento de Efluentes Utilizando Modelos NARX Polinomiais – ROSIMEIRE APARECIDA JERÔNIMO, CLAUDIO GARCIA
- BT/PTC/0406 – Cálculo da Faixa de Captura de um PLL de Ordem $n + 1$ Combinando a Teoria dos Sistemas Dinâmicos com o Método do Lugar das Raízes – ANTONIO CARLOS ROSSO JÚNIOR, JOSÉ ROBERTO CASTILHO PIQUEIRA

- BT/PTC/0407 – Propostas para Comunicação por Espalhamento Espectral com Caos – ANSELMO RODRIGUES, JOSÉ
ROBERTO CASTILHO PIQUEIRA
- BT/PTC/0408 – Influência de Aberturas na Efetividade de Blindagem: Uma Análise Computacional – MARCIO ANTONIO
MATHIAS, JORGE MIECZYSLAW JANISZEWSKI

