

# Simulação Eletrodinâmica da Propagação de Modos entre Planos de Referência em Placas de Circuito Impresso.

Thomaz Milton Navarro Verástegui<sup>1</sup> e Wilson Arnaldo Artuzi Junior<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEFET-PR, Sete de Setembro, 3165, CEP 80230-222, Curitiba, Paraná

<sup>2</sup>UFPR, Centro Politécnico, sn, Curitiba, Paraná

**Resumo** ✎ Este trabalho mostra as relações entre a forma como o sinal se propaga em uma placa de circuito impresso com múltiplas camadas e a propagação de modos indesejados nesta estrutura. Basicamente o que é analisado é a propagação de ondas entre planos de referência em placas de várias camadas. O método para análise é a simulação utilizando FDTD (*Finite Element Time Domain*). O objetivo é minimizar este efeito através da correta interligação dos planos de referência.

**Palavras-chaves** ✎ Placas de Circuito impresso de múltiplas camadas, vias, propagação de modos, planos de referência, elementos finitos.

## I. INTRODUÇÃO

As placas de circuito impresso (PCI) para circuitos eletrônicos atuais, cada vez mais adotam a construção com múltiplas camadas de planos condutores. Tipicamente alguns planos são reservados para as trilhas (que interligam os vários circuitos) e outros para alimentação e terra (chamados planos de referência), como na Fig. 1. A propagação de um sinal em uma trilha, sempre se dá em relação a um plano de referência ou a uma outra trilha [7].

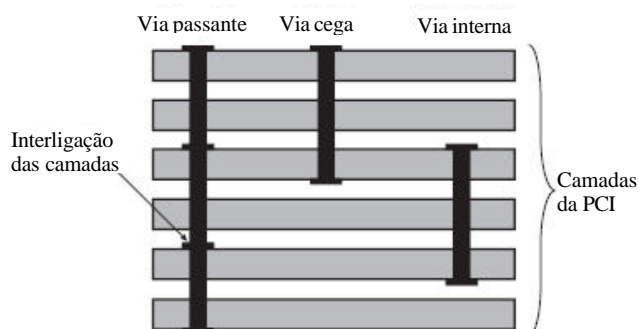


Fig. 1. Corte de uma placa de circuito impresso de múltiplas camadas.

Quando temos vários planos com trilhas e vários planos de referência em uma mesma placa, o sinal entre dois circuitos, geralmente muda de plano no seu trajeto entre o emissor e o receptor de sinal, esta mudança de plano se dá

através de furos de passagem, denominados vias [1], Fig. 1. Toda a vez que o sinal muda de plano, há uma mudança na referência, e isto pode acarretar a geração de ondas indesejáveis que carregam energia entre planos de referência [6].

Desta forma é importante definir uma abordagem durante o projeto da placa de circuito impresso, para minimizar este efeito, que se torna cada vez mais evidente com o aumento da miniaturização dos dispositivos eletrônicos e da frequência de operação [5].

A metodologia adotada aqui neste trabalho foi a de simular um trecho de circuito impresso, denominada estrutura, utilizando o método dos elementos finitos no domínio do tempo FDTD (*Finite Element Time Domain*) [3][4].

## II. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA

O arranjo ensaiado corresponde a uma trilha de saída de um circuito integrado BGA (*Ball Grid Array*) com espaçamento entre os terminais (bolas, *Solder Ball*) de 1 mm. Esta trilha começa em um terminal no plano superior da placa, lado dos componentes, segue até um furo de passagem (denominado *break-out* do BGA) por 1 mm e a partir deste ponto esta trilha começa a propagar o sinal em camadas internas da placa de circuito impresso. Um circuito integrado com encapsulamento BGA, mostrado na Fig. 2, apresenta tipicamente nos terminais próximos ao centro, alimentação e terra (referência), e nos pinos mais externos os sinais de alta frequência, como mostrado na Fig. 3.

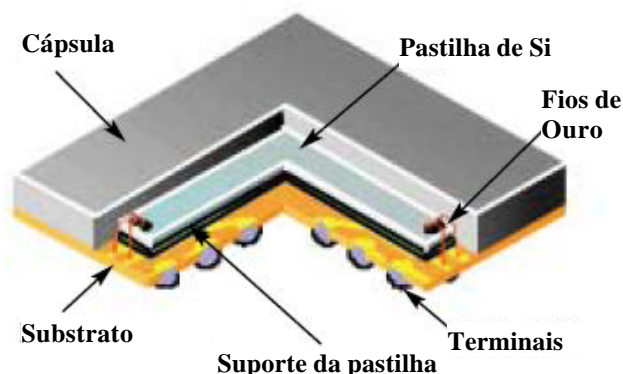


Fig. 2. Típico Circuito integrado com encapsulamento BGA.

Thomaz Milton Navarro Verástegui, [thomaz@cefetpr.br](mailto:thomaz@cefetpr.br), [thomaz.ext@siemens.com](mailto:thomaz.ext@siemens.com), Tel.: +55 41 3341-5619; Wilson Arnaldo Artuzi Junior.: [artuzi@eletrica.ufpr.br](mailto:artuzi@eletrica.ufpr.br), Tel.: +55 41 3361-3226

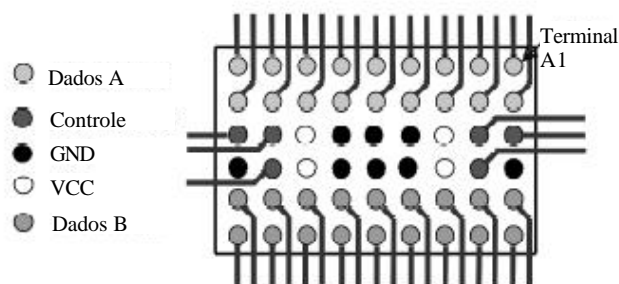


Fig. 3. Circuito integrado BGA, mostrando sinais e referências.

Como existem diferentes posições para o terminal emissor de sinal (Dados A ou B na fig. 3), será necessário determinar se o resultado é ou não dependente desta posição.

Na Fig. 3 estão representados os terminais de terra (GND) no centro do circuito integrado BGA. Estes terminais serão representados como um plano de referência na base da estrutura, perpendicular à direção de propagação.

Desta forma dois aspectos serão avaliados neste trabalho:

- A. O efeito da distância entre o terminal emissor e o plano de terra (referência), Plano de Base;
- B. O efeito da interligação dos planos de referência na propagação do sinal.

A avaliação da estrutura será feita computacionalmente a partir do método dos elementos finitos no domínio do tempo, FDTD [3][4].

Um corte do modelo para a avaliação do efeito da distância da fonte em relação ao plano de GND é mostrado na Fig. 4, onde a distância  $d$ , que será avaliada é indicada.

Nesta estrutura está evidenciada a interligação entre os planos de referência na base da estrutura, denominado Plano de Base, que corresponde aos terminais internos do circuito integrado BGA. Desta forma a fonte de corrente é aplicada entre este plano de base e o terminal da dados do circuito integrado, que pode estar em diferentes posições em relação ao plano de base (distância  $d$ ).

O sinal se propaga através da linha externa (microstrip) onde está aplicada a corrente, até encontrar a via, neste ponto o sinal passa a se propagar através de uma linha interna (strip-line), nesta linha interna passam a existir dois planos de referência para este sinal, mostrados na figura através das tensões  $V1'$  e  $V1$ .

A estrutura é terminada em uma superfície absorvedora, ou seja, após a via, uma superfície ABC (*Absortion Boundary Condition*) é aplicada à estrutura para que esta se comporte como infinita a partir deste ponto, a impedância superficial desta é a mesma do meio.

O Plano de Base é feito através de uma superfície condutora ou PEC (*Perfect Electric Conductor*), esta superfície interliga todos os planos de referência condutores da estrutura.

A estrutura é construída a partir de trilhas condutoras em material dielétrico FR4 (composto de resina e fibra de vidro com permissividade elétrica relativa de aproximadamente 4.2 e permeabilidade elétrica igual ao do

vácuo), este material é o mais comum em placas de circuito impresso de boa qualidade.

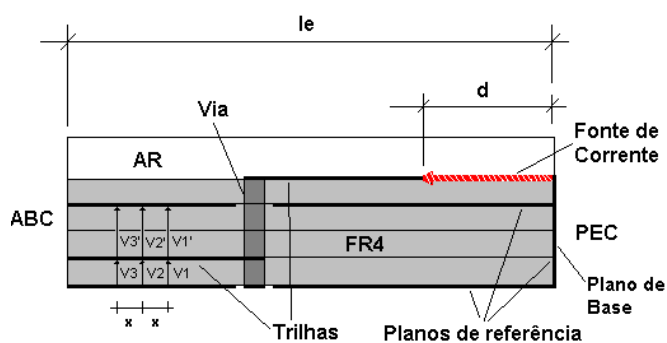


Fig. 4. Corte longitudinal do arranjo utilizado para avaliar o efeito da distância  $d$ . A figura mostra onde as tensões são medidas e a composição dos materiais (FR4  $\epsilon_r = 4.2$ ,  $le = 2 \text{ mm} + d$ , espaçamento entre camadas de FR4 de 0.1 mm)

Esta mesma estrutura é mostrada em corte transversal na Fig. 5. Estão representadas nesta figura as trilhas, os planos de referência, a via e as paredes laterais, que são terminadas em uma superfície ABC, desta forma a estrutura se comportará como se fosse muito larga.

Fica evidenciada também na Fig. 5 as dimensões envolvidas, o valor de  $w$  é de 0.1 mm.

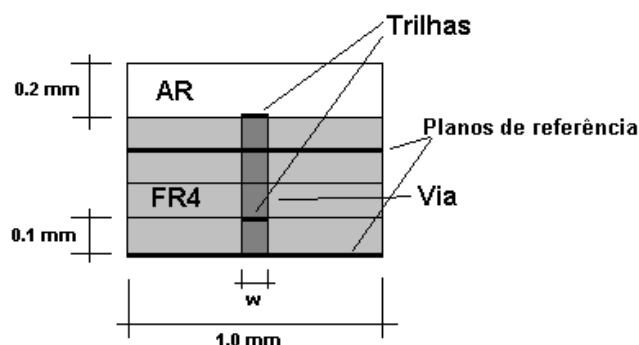


Fig. 5. Corte transversal do arranjo. As paredes laterais são terminada em superfície ABC (FR4), largura da trilha  $w = 0.1 \text{ mm}$ .

Como os planos de referência são interligados somente na base, o efeito da via, que muda a trilha por onde o sinal aplicado se propaga, causa uma descontinuidade na onda eletromagnética [6], pois ocorre uma mudança no plano de referência. Na fig. 5 se nota que para a trilha externa, o plano de referência está logo abaixo, porém quando o sinal muda para a trilha interna, a referência está agora acima (0.2 mm) e abaixo (0.1 mm). Esta mudança, devido a esta descontinuidade, acarreta a geração de uma onda entre os planos de referência, que se propaga até os extremos da placa de circuito impresso. Esta onda é indesejável pois além de retirar energia da onda que é transmitida, pode causar irradiação indesejável na borda da placa de circuito impresso [5] [6].

Uma maneira de reduzir esta geração das ondas entre os planos de referência é interligar os planos de referência no sentido longitudinal, ou seja, paralelo as trilhas, como mostrado na Fig. 7.

Para avaliar o efeito da interligação dos planos de referência, foi definida uma nova estrutura, pois através da primeira, Fig.4, os pontos de medida estão dispostos após a descontinuidade causada pela via.

O novo arranjo apresenta duas vias, de forma que o efeito da interligação pode ser avaliado também através do coeficiente de reflexão. A estrutura é mostrada na Fig. 6.

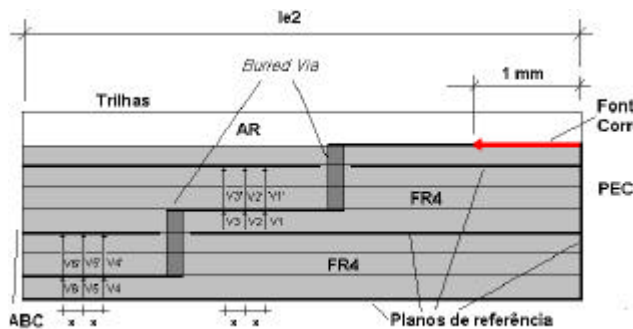


Fig. 6. Corte longitudinal do arranjo utilizado para avaliar a o efeito da interligação dos planos de referência. A figura mostra onde as tensões são medidas e a composição dos materiais (FR4 er = 4.2,  $le_2 = 6\text{ mm}$  , espaçamento entre camadas de FR4 de  $0.1\text{ mm}$ )

Como será feita a análise para freqüências elevadas, o tipo de via foi alterado para via interna (*buried*), pois esta é mais indicada para sinais de altas freqüências [1]

Neste arranjo, as paredes laterais são condutoras, interligando os planos de referência. A distância entre estas paredes ( $2.wp$ ) foi alterada e observado como se comportam as tensões nos 6 pontos de medida.

A Fig. 7 mostra este arranjo em corte transversal, evidenciando a distância  $wp$ , que foi o parâmetro avaliado.

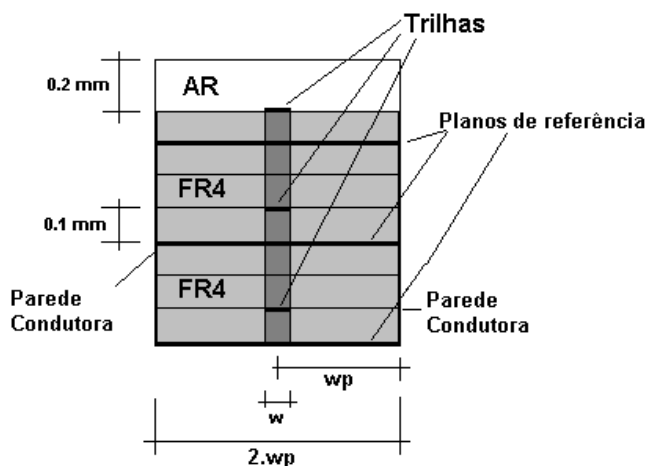


Fig. 7. Corte transversal do arranjo. As paredes laterais são terminada em superfície condutora PEC (Cobre), largura da trilha  $w = 0.1\text{ mm}$ . Parâmetro avaliado  $wp$ .

### III. SEPARAÇÃO DOS MODOS DE PROPAGAÇÃO

Para avaliar o comportamento elétrico do sinal se propagando na numa trilha entre planos de referência, foi observada a tensão em pontos distintos da linha de transmissão. Como esta linha é referenciada à um plano de referência superior e outro inferior, vai surgir um campo elétrico diferente, referenciado a cada um destes planos, e por conseguinte uma tensão entre os planos, denominada tensão placa-placa ( $V_{pp}$  – *parallel plates*), bem como uma tensão da trilha em relação aos dois planos, denominada tensão linha-plano ( $V_{sl}$  – *strip line*).

As figuras 8 e 9 mostram estas tensões e as respectivas linhas de campo elétrico.

Nos arranjos propostos, Fig. 4 e 6, as tensões são medidas em três pontos, em relação aos planos superiores  $V1' \dots V3'$ , e em relação ao plano inferior,  $V1 \dots V3$ .

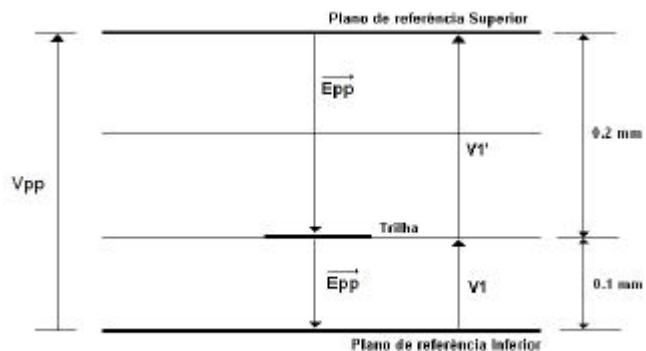


Fig. 8. Corte transversal do arranjo, mostrando os campos entre os planos de referência. Nesta figura estão mostrados as tensões e campos elétricos para modo placa-placa.

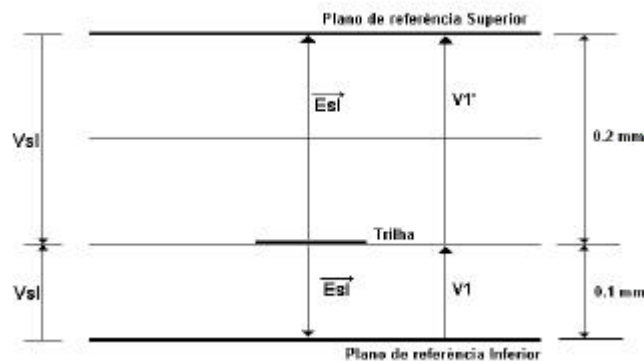


Fig. 9. Corte transversal do arranjo, mostrando os campos entre os planos de referência. Nesta figura estão mostrados as tensões e campos elétricos para modo linha-plano.

Como a tensão na trilha após a via é referenciada ao plano de referência embaixo e em cima desta, podemos relacionar estas tensões de forma a separar as tensões de placa-placa e linha-plano (os dois diferentes modos de propagação).

Com base nas figuras 8 e 9, pode-se escrever:

$$V1 = Vsl_1 + Vpp_1/3 \quad (1)$$

$$V1' = -Vsl_1 + 2 \cdot Vpp_1/3 \quad (2)$$

Donde se obtém :

$$Vsl_1 = 2 \cdot V1/3 - V1'/3 \quad (3)$$

$$Vpp_1 = V1 + V1' \quad (4)$$

Tipicamente a tensão de placa-placa é muito pequena se comparada com a de linha-plano, logo, foi definida uma grandeza denominada relação entre modos, dada por:

$$R_{mod} = 20 \cdot \log(Vpp/Vsl) \quad (5)$$

Quanto menor for esta relação, mais imune está a estrutura aos modos de propagação placa-placa.

A transmissão do modo linha-plano, é avaliada encontrando o coeficiente de reflexão (tensão linha-plano) entre as vias. Desta forma o é possível mensurar o efeito da descontinuidade imposta pela segunda via.

O coeficiente de reflexão é obtido a partir das três amostras de tensão do modo linha-plano, justificando assim os três pontos nas estruturas propostas, e é referenciado ao ponto central.

Utilizando as equações de propagação em linhas de transmissão tem-se:

$$Vsl1 = Vi \cdot e^{g \cdot x} + Vr \cdot e^{-g \cdot x} \quad (6)$$

$$Vsl2 = Vi + Vr \quad (7)$$

$$Vsl3 = Vi \cdot e^{-g \cdot x} + Vr \cdot e^{g \cdot x} \quad (8)$$

Onde  $\gamma$  é a constante de propagação,  $x$  é a distância entre os pontos (Fig. 4 e 6),  $Vr$  é a amplitude da tensão refletida e  $Vi$  é amplitude da tensão incidente.

A referência é tomada no ponto central, e os valores que entram na simulação são os da tensão de linha ( $Vsl$ ) para os três pontos no trecho entre as vias (Fig.6) e para o trecho após a segunda via, (Fig.6).

A soma de (6) com (8) fornece:

$$e^{g \cdot x} = \frac{Vsl1 + Vsl3}{2 \cdot Vsl2} \pm \sqrt{\left[ \frac{Vsl1 + Vsl3}{2 \cdot Vsl2} \right]^2 - 1} \quad (9)$$

Como o coeficiente de reflexão é a relação entre a tensão refletida pela incidente, e a referência é a tensão no centro, então:

$$\Gamma_2 = \frac{e^{g \cdot x} - \frac{Vsl1}{Vsl2}}{\frac{Vsl1}{Vsl2} - e^{-g \cdot x}} \quad (10)$$

O coeficiente de reflexão foi então calculado com dois propósitos:

- Para avaliar a propagação do modo linha placa no primeiro trecho, evidenciando assim o efeito da descontinuidade provocada pela via e mudança de plano, como mostrado na Fig. ;
- Para validar a simulação pois no segundo trecho a linha é casada, e se a simulação estiver correta o valor neste trecho será muito baixo e constante em função da frequência.

### III. RESULTADOS OBTIDOS

Foi avaliado para o primeiro arranjo, o caso de um circuito integrado BGA que apresenta após os terminais de referência, 4 fileiras de terminais de sinais de alta frequência, espaçadas de 1mm [7] e [8].

Portanto a primeira estrutura, Fig. 4, foi simulada para  $d$  igual a 1 mm, 2 mm, 3 mm e 4 mm.

O sinal de excitação (corrente) aplicado é um pulso de corrente que fornece uma resposta plana em frequência até 25 GHz.

Como o que está sendo avaliado no primeiro arranjo é o efeito de diferentes valores de  $d$ , na geração de modos placa-placa, a relação de modos, como definida em (5) está apresentada no gráfico mostrado na Fig. 10.

Percebe-se pelos valores mostrados na Fig. 10, que a distância  $d$  não apresenta alteração significativa na geração do modo placa-placa, portanto para a abálise da segunda estrutura, o valor de  $d$  foi fixado em 1 mm, minimizando assim o esforço computacional.

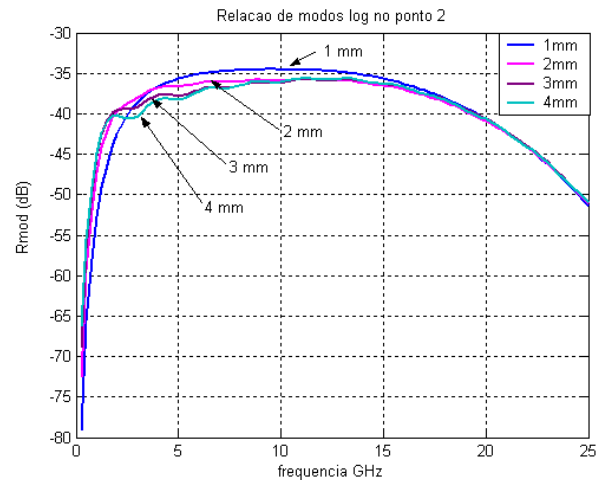


Fig. 10. Relação de modos na trilha inferior em função da distância  $d$ , entre terminal emissor do BGA e terminais de referência.

O arranjo da Fig. 6, é utilizado para avaliar o efeito da interligação dos planos de referência distantes  $w_p$  do centro do arranjo, como mostrado na Fig. 7.

Este efeito é mostrado através da relação de modos no segundo trecho de trilha (após via inferior) onde o efeito de mudança de plano é mais evidente.

O resultado para  $w_p$  igual a 0.15 mm, 0.25 mm, 0.50 mm, 0.90 mm e 1.10 mm é mostrado na Fig. 11.

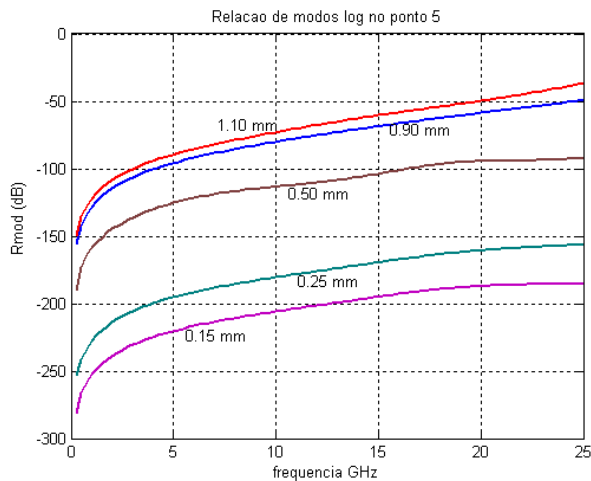


Fig. 11. Relação de modos na trilha inferior (Fig. 6) em função da distância da parede condutora lateral e o centro da trilha ( $w_p$ ).

Como somente a relação de modos não é suficiente para avaliar o efeito da descontinuidade provocada pela via, foi avaliado o coeficiente de reflexão, na trilha intermediária da Fig. 6, segundo (10), como mostrado na Fig. 12.

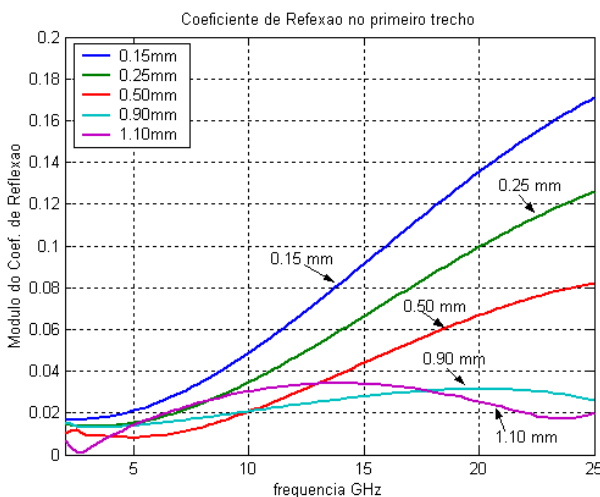


Fig. 12. Módulo do coeficiente de reflexão na trilha intermediária (Fig. 6), em função da distância entre a parede condutora lateral e o centro da trilha ( $w_p$ ).

## II. CONCLUSÕES

Para que seja reduzida a geração do modo de propagação placa-placa, é indispensável que se interligue os

planos de referência sempre que a trilha tiver mudar de camada, onde ocorra a alteração da referência. Neste trabalho foi verificado que quanto mais próximo for a interligação dos planos de referência da via, menor será a geração deste modo indesejado (placa-placa), porém isto prejudica a propagação do modo desejado (linha-plano), devido a descontinuidade causada pela via. Desta forma, deve-se procurar uma solução satisfatória para ambos os casos. Logo para minimizar a geração do modo placa-placa e maximizar a propagação do modo linha-plano é necessário avaliar a relação de modos e o coeficiente de reflexão. No arranjo simulado a distância que melhor se encaixa no descrito aqui é  $w_p = 0,90$  mm, pois nesta situação o coeficiente de reflexão é baixo e constante e a relação de modos é aceitável ( $R_{mod} < -50$  dB).

O próximo passo é encontrar uma forma de interligar os plano de referência utilizando vias no lugar de uma parede lateral condutora, o número de vias, a distância entre estas vias e entre a trilha serão os parâmetros que deverão ser encontrados.

## REFERÊNCIAS

- [1] G. Antonini, M. Lai, A. Orlandi and V. Ricchiuti, "Characterization of Holes on printed Circuit Boards", *SPI 2004*, pp. 211-214, 1994.
- [2] Houfei Chen, Qin Li, Leung Tsang and Vikram Jandhyala, "Coupling of large number of vias in electronic packaging structures and differential signaling", *IEEE MTM Digest*, pp. 983-986, 2002
- [3] W. A. Artuzi Jr, "Finite Element Time Domain Method Using Piecewise Constants Basis Functions", *SBMO/IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference*, Vol no. 2, pp. 1029-1032, Foz do Iguaçu 2003.
- [4] A. TAFLOVE, "Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time-Domain Method", Artech House, Boston, 1995.
- [5] Haw-Jyh Liaw and Henn Merkelo, "Simulation and Modeling of Mode Conversion at Vias in Multilayer Interconnections", pp. 361-367, IEEE, 1995.
- [6] Jun So Pak, et al., "Coupling of Through-hole Signal Via to Power/Ground Resonance and Excitation of Edge Radiation in Multi-Layer PCB", pp. 231-235, IEEE, 2003.
- [7] ALTERA – Applications Notes, "Designing With High-Density BGA Packages for Altera Devices", <http://www.altera.com/literature/an/an114.pdf>.
- [8] Fujitsu -, "ASIC Packaging", <http://www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fma/pdf/ASIC20PKG.pdf>