

Caracterização da permissividade dielétrica efetiva em Placas de Circuito Impresso que operam em micro-ondas utilizando linhas de microstrip e o método de diferença de fase

Pedro Henrique Santos¹, Rodolfo Antônio da Silva Araújo¹, Eleandro Marques¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

Programa de Capacitação Institucional - PCI.

pedro.santos@inpe.br

Resumo. *A caracterização de PCB,s para o desenvolvimento de sistemas de RF que operam em micro-ondas é de vital importância para sua otimização e maior rendimento. Técnicas que utilizam linhas microstrips para caracterização dielétrica são amplamente aceitas, devido a fácil implementação, baixo custo e permitem diferentes análises. O objetivo deste trabalho é a caracterização do substrato RT DUROID 10.5, analisando a resposta em diferentes frequências, onde a hipótese a ser avaliada é se os padrões relativos ao dielétrico sofrem desvios durante a etapa de construção que prejudiquem ou inviabilizem o desenvolvimento de sistemas que operam em micro-ondas. Foram realizados testes elétricos para validar a técnica e procedimentos adotados. Os resultados foram comparados com simulações de outros autores em diferentes situações e permitiram avaliar o potencial da técnica, fornecendo orientações e procedimentos futuros para o desenvolvimento de estruturas microstrips que operam em RF, demonstrando assim a viabilidade do procedimento para novos projetos.*

Palavras-chave: Permissividade dielétrica efetiva; SSPA,s; Antenas microstrips; Sistemas microondas.

1. Introdução

Sistemas modernos que operam em RF nas regiões micro-ondas, utilizam placas PCB,s para a montagem de circuitos eletrônicos e também na construção de filtros e antenas microstrips. A observação e a análise relativa ao comportamento da resposta de sinais aplicados na PCB são de extrema importância, pois fornecem dados que podem ser utilizados de forma preliminar para a devida tomada de decisão, para que os projetos não sejam comprometidos devido a interferências, perdas de sinal e ou incoerência na resposta do mesmo, isso devido à descontinuidades presentes na placa, falhas e também mudanças do ambiente no qual o sistema opera [VEGHTE, BALANIS (1986); POZAR, (2011)].

Com os avanços tecnológicos e implementações de técnicas que utilizam microstrips a utilização de PCB,s em sistemas micro-ondas se torna fundamental como por exemplo em projetos de filtros, Amplificadores de Estado Sólido (SSPA,s), e antenas microstrips, sistemas presentes em radares de Abertura Sintética (SAR), sendo que o comportamento da resposta do sinal é de vital importância, pois os radares SAR, operam emitindo sinais pulsados para o meio e com isso, pode haver uma alteração entre os sinais gerados, os aplicados no SSPA e aqueles transmitidos pela antena, onde o devido conhecimento de irregularidades em cada uma das etapas, fornece ferramentas para que sejam elaboradas condições de contorno para minimizar e ou eliminar tais irregularidades, fazendo com que o sistema possua melhor rendimento, conferindo assim sua devida otimização e reduzindo os custos do projeto, consumo de energia do sistema, e maior tempo de vida dos mesmos, pois operam dentro de condições desejadas ou que possam ser extrapoladas à partir das informações geradas pelos modelos que foram estabelecidos nas etapas preliminares [BALANIS, 2012].

Com isso, a caracterização das placas PCB,s é uma das primeiras etapas para o desenvolvimento destes projetos, onde as medidas provenientes das constantes dielétricas dos materiais presentes em substratos micro-ondas, podem ser realizadas utilizando métodos de ressonância, sendo os mais conhecidos os métodos de cavidades ressonantes e o método que utiliza duas linhas microstrips de diferentes comprimentos, sendo que a diferença de fase dos sinais de resposta obtidos à partir dos parâmetros de espalhamento, podem fornecer a permissividade efetiva e_{eff} do substrato utilizado [POZZAR, (2011)].

O método que utiliza duas linhas microstrips possui a vantagem de ser relativamente mais simples de se implementar e oferece bons resultados quando observados os devidos cuidados em sua implementação na etapa de caracterização do dispositivo, fornecendo a vantagem de serem de baixo custo, e também possibilita a implementação para diversas frequências. O método que utiliza 2 linhas, são recomendados para a medição dos padrões das constantes dielétricas efetivas de substratos e o mesmo pode fornecer uma acurácia de 0,5 à 0,1 % [DAS et al., (1987); CHANG et al., (2006)].

O método consiste em fazer a aquisição dos dados de fase para diferentes frequências em ambas as linhas projetadas. A constante dielétrica efetiva do material pode ser determinada pela diferença de fase obtida à partir dos parâmetros de espalhamento medidos para as duas linhas de transmissão.

Equações recursivas já descritas na literatura são configuradas para se alcançar os objetivos esperados e com isso fazer o comparativo com os valores padronizados. Outro fator que deve ser considerado é que o comprimento para cada uma das linhas seja projetado para que se obtenha resultados com boa precisão.

Contudo, para a devida caracterização do substrato, foram projetadas, desenvolvidas e construídas duas linhas microstrips de diferentes comprimentos. Posteriormente foram realizados testes elétricos utilizando um analisador de rede vetorial em diferentes frequências. Os resultados obtidos foram então processados e uma análise detalhada das etapas de desenvolvimento e da permissividade encontrada são descritos.

Uma comparação dos resultados obtidos da permissividade dos substratos foi realizada com trabalhos anteriores realizados por Tude e Chiarello (1983), onde os autores utilizaram o Método de Monte-Carlo para avaliar a tolerância em linhas microstrips e simular a permissividade dielétrica do material em diferentes situações e com isso, a comparação permitiu demonstrar o potencial da técnica utilizada e forneceu ferramentas para a devida realimentação de parâmetros que possam otimizar o rendimento dos sistemas micro-ondas a serem desenvolvidos e testados experimentalmente de forma controlada.

Sendo assim, uma abordagem sistêmica foi demonstrada permitindo a tomada de decisões mais condizentes para as diferentes situações apresentadas, o que pode reduzir o tempo de planejamento e construção de sistemas que utilizam linhas microstrips, como por exemplo, filtros, SSPA,s e antenas presentes em radares SAR modernos, fazendo com que as fontes de descontinuidades possam ser modeladas à partir da análise da caracterização, o que garante menores índices de erros durante a construção e operação dos sistemas.

1.1 Linhas microstrips

Para o devido projeto de linhas microstrips, parâmetros básicos como a razão w/h são conhecidos e amplamente aceitos para o projeto de sistemas microondas que envolvem linhas de transmissão. Outro fato a se considerar é que a relação da largura da linha (w), pela espessura do substrato (t), fornecem resultados que já foram experimentados e seguem modelos descritos na literatura, servindo de base para análises de desempenho de projetos.

A impedância característica da linha é intrinsecamente relacionada à largura, a constante dielétrica do substrato e da profundidade do dielétrico e estes fatores devem ser observados com rigor, pois a velocidade de propagação dos sinais sofre influências que podem reduzir a performance do sinal devido a perdas no sistema físico [BALANIS, (2012)].

A figura abaixo demonstra um modelo típico de linha microstrip e os parâmetros descritos.

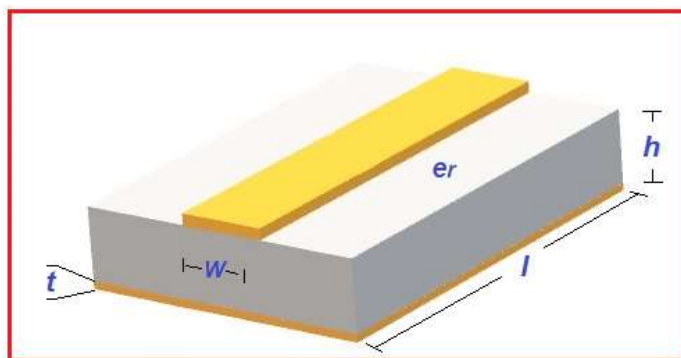


Figura 1. Modelo e parâmetros de uma linha microstrip. [Autor]

A identificação de erros que possam surgir devido à falta destes parâmetros bem consolidados, como à rugosidade do material após a fresagem, irregularidades presentes na placa utilizada e falhas nas trilhas referente às linhas permitem que sejam desenvolvidas ferramentas para a modelagem e as possíveis condições de contorno para a situação apresentada, melhorando assim a acurácia e precisão da resposta. Sendo assim, a devida caracterização da linha, fornece os parâmetros necessários para que sejam alcançados os requisitos de projetos e sistemas que operam em micro-ondas [POZAR, (2011)].

2. Metodologia

A etapa de caracterização consistiu no projeto, simulação e construção de duas linhas microstrips, onde foi considerada uma frequência de 1,25 GHz e uma impedância característica de 50 Ohms para as duas linhas desenvolvidas.

As especificações contidas nas placas, referentes ao substrato, fornecem os parâmetros relativos à altura do substrato (h), espessura da fita condutora de cobre (t), e da permissividade relativa (ϵ_r). Os valores segundo especificações do fabricante seguem abaixo.

Altura do substrato (h) = 1,27 (mm)

Espessura da fita condutora (t) 'cobre' = 0,035 (mm)

Permissividade relativa (ϵ_r) = 10.5

Tais especificações foram utilizadas para o cálculo numérico das características das linhas e utilizadas nas equações recursivas, sendo descritas em Pozar (2011).

Inicialmente, para se determinar a constante dielétrica efetiva ϵ_{eff} das linhas considera-se a equação 1.

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 * \left(\frac{d}{w}\right)}} \right) \quad (1)$$

Para o devido cálculo a constante dielétrica efetiva, a mesma é avaliada em um meio homogêneo, mesmo estando entre dois meios diferentes (ϵ_r e substrato), onde as considerações para este caso são mais próximas de uma condição real [POZAR, 2011].

Para avaliar a impedância característica da linha, definida para o projeto utilizou-se a seguinte equação.

$$Z_0 = \left\{ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} \left[\frac{w}{d} + 1,393 + 0,667 * \ln\left(\frac{w}{d} + 1,444\right) \right]} \right\} \text{ para } w/d \geq 1. \quad (2)$$

Após determinados a constante dielétrica efetiva ϵ_{eff} , o valor de Z_0 , o cálculo para a razão (w/d) é assim definida.

$$\frac{w}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A}-2} & \text{para } w/d \leq 2. \end{cases} \quad (3)$$

As equações descritas foram utilizadas para determinar os parâmetros necessários para a construção das linhas L1 e L2, e com isso realizar os testes elétricos, sendo que a constante dielétrica efetiva calculada usando as equações descritas foi de 7,057.

2.1 Etapa de simulação das linhas

A etapa de simulação foi realizada utilizando o software de simulação CST. Os parâmetros S11 e S21 foram analisados em uma frequência de 1,25 GHz, para as devidas comparações com o modelo físico a ser construído e possíveis melhorias antes da construção do mesmo.

2.2 Etapa de construção da placa.

As linhas foram otimizadas à partir das simulações e com isso construídas em um substrato PTFE DUROID 6010-5, da marca ROGERS, com as especificações citadas anteriormente.

Para a construção das placas foi utilizado uma fresadora de marca LPKF, modelo Protomat M60, com diferentes fresas, uma próxima a linha com 0,5mm e outra fresa para a retirada da parte dispensável de cobre de 1mm. Tal procedimento visa maior precisão dos resultados a serem obtidos da linha após a fresagem.

2.3 Etapa de caracterização elétrica da placa.

As placas construídas foram então afixadas em uma base com 44,8 mm de largura, 6,2mm de altura e 90mm de comprimento, para L1 e 40mm de largura, 6,2 mm de altura e 40mm de comprimento, para a L2, sendo a base, uma liga metálica composta por cobre e zinco. Foram então fixados na base metálica os conectores SMA fêmea, para a devida conexão entre o VNA e os terminais da linha, servindo também como plano terra. A Figura 2 demonstra o modelo das linhas e o setup de montagem para os testes elétricos.

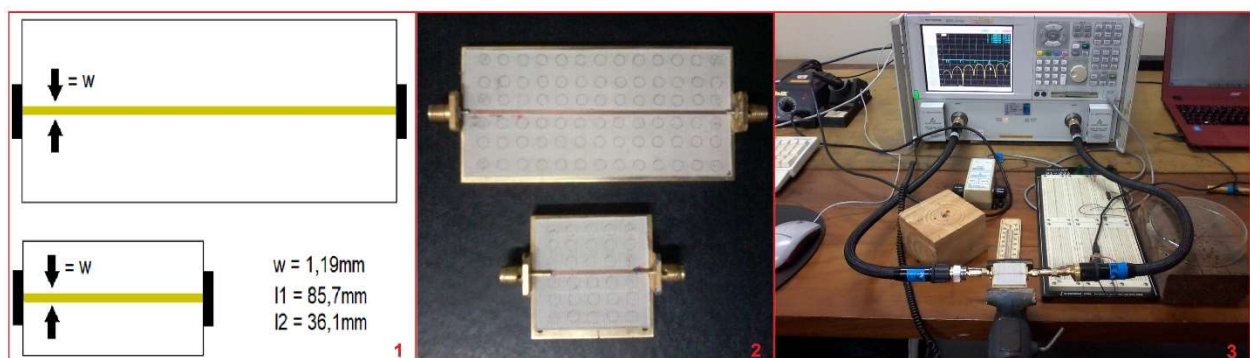


Figura 2. Linhas L1 e L2 montadas para caracterização e setup de testes.

Na Figura 2, em 1 temos a largura e comprimento das linhas projetadas, em 2 as linhas montadas na base e com conectores SMA e em 3, o setup de testes em laboratório. Para a

caracterização dos parâmetros elétricos requeridos e para a determinação da e_{eff} , utilizou-se um analisador de rede vetorial da marca AGILENT e modelo E8364B com alcance de 10MHz a 50GHz. O alcance de frequência definido para o experimento foi de 500MHz a 9GHz. As medidas foram conduzidas após a estabilização do equipamento e em uma sala com temperatura controlada. Os parâmetros S foram amostrados de forma simples, onde foram tomadas 3 repetições para cada um dos experimentos e o mesmo procedimento foi repetido em ambas as linhas, onde os dados foram armazenados para posteriores análises.

2.4 Determinação da permissividade efetiva da linha usando o método de diferença de fase dos sinais

Após a coleta de dados relativos aos parâmetros S das placas L1 e L2, os dados foram processados para a devida utilização dos mesmos na determinação da permissividade efetiva do material e_{eff} utilizado. O método que utiliza a diferença de fase dos sinais em função da frequência, diferença de fase e considerando a variação do comprimento das linhas é descrito e pode ser analisado detalhadamente em DAS et al., (1987). Contudo, a equação para e_{eff} é descrita na equação 6.

$$e_{eff} = \left(\frac{\Delta\theta * c}{2\pi f(\Delta l)} \right)^2 \quad (5)$$

Onde :

c = Velocidade da Luz.

$\Delta\theta$ = Variação de fase.

Δl = Variação do comprimento das linhas.

Segundo os autores, o método proposto permite fazer medidas das constantes dielétricas para os substratos com acurácia em torno de 0,5% a 1%, e também com a vantagem de fornecer medidas para diferentes frequências (DAS et al., 1987).

Os erros relativos a reatância e casamento são suprimidos pela diferença de fase entre as duas linhas utilizadas, e um melhor desempenho pode ser conseguido com o uso de conectores que sejam mais idênticos possíveis. Os dados foram então devidamente processados para as três repetições realizadas e com isso foi possível determinar a permissividade efetiva do material em função da frequência em um alcance de 0,5 a 9 GHz, demonstrando a eficiência da técnica utilizada.

3. Resultados e Discussão

Para a devida análise dos resultados, inicialmente foram realizadas as medidas físicas das placas após a fresagem. Este procedimento se faz necessário para que sejam avaliados os erros sistêmicos e mecânicos entre o modelo simulado e o modelo real. Posteriormente foi realizada a comparação dos valores calculados com os valores obtidos do modelo físico desenvolvido.

3.1 Medidas relativas a profundidade do substrato.

Para definir a profundidade do substrato, foram demarcados ao longo da superfície do mesmo, pontos para se fazer a medição para cada uma das linhas. Os pontos formaram uma grade de 3x13 pontos para a linha L1 e 3x5 para a linha L2. Este procedimento foi realizado no lado esquerdo e direito da linha. Foram então realizadas medições dos pontos demarcados na grade ao longo do substrato referente às linhas. Para isso foi utilizado um micrômetro de marca Kingtools com resolução de 0,01mm. Posteriormente foi calculado a média das profundidades amostradas, considerando a linha L1 e a linha L2, e com isso foram contabilizados os desvios referentes à cada uma de forma isolada. A largura da linha (w) foi medida ao longo dos pontos demarcados na grade utilizando um paquímetro de marca Mytutoyo, com precisão de 0,02mm. Para reduzir o erro foram realizadas três repetições e com isso a média e o desvio padrão foram avaliados para cada linha.

Após o tratamento estatístico dos dados, os mesmos foram utilizados para gerar o gráfico de superfície das linhas L1 e L2 demonstrado na Figura 3.

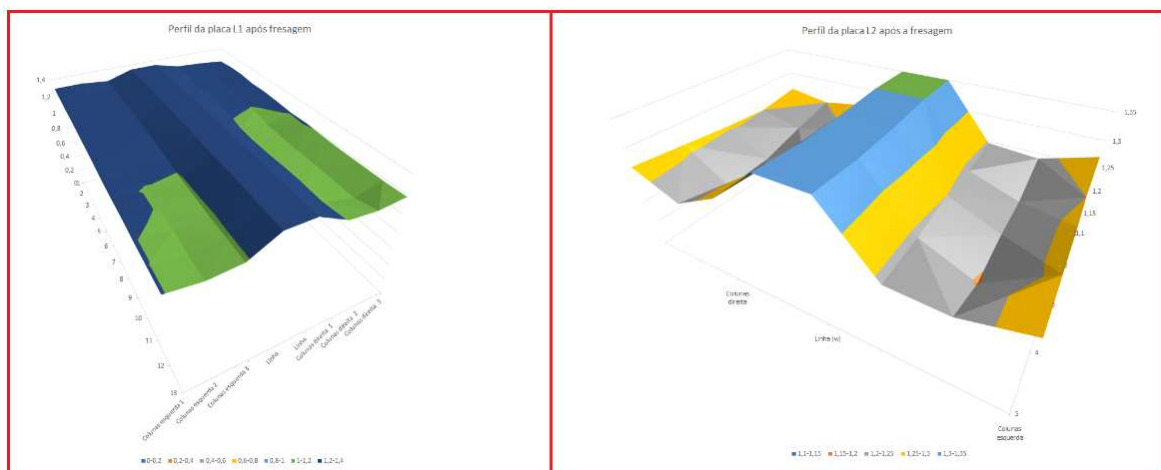


Figura 3. Perfil das linhas L1 e L2 do modelo físico construído.

É possível perceber na Figura 3 que durante o processo de fresagem, a profundidade do substrato não se dá de forma homogênea. Tanto em L1 quanto em L2 ocorre variações de altura do substrato ao longo da estrutura, sendo que ao centro de cada uma das figuras, temos a linha microstrip, que também sofre uma pequena variação, porém é mais notável em L2, que pode ser observado no detalhe em verde.

As informações obtidas e processadas servem como um modelo para a análise de possíveis erros que possam ocorrer durante as outras etapas de caracterização, pois a diferença nos parâmetros que foram definidos para o projeto, ao sofrerem alterações como as descritas podem fornecer resultados diferentes daqueles que se espera. O conhecimento prévio das irregularidades entre o modelado e o projetado, induz à geração de condições de contorno para que sejam obtidos os resultados mais fidedignos ao projeto de estruturas que operam

em frequências micro-ondas e que sejam mais complexos, onde na grande maioria das vezes, são sensíveis à mudanças estruturais como as observadas.

3.2 Resultados relativos aos cálculos numéricos utilizando as equações recursivas.

Com os dados devidamente processados foi possível gerar a curva de permissividade efetiva do material em função das frequências utilizadas, sendo que a mesma pode ser vista na Figura 4.

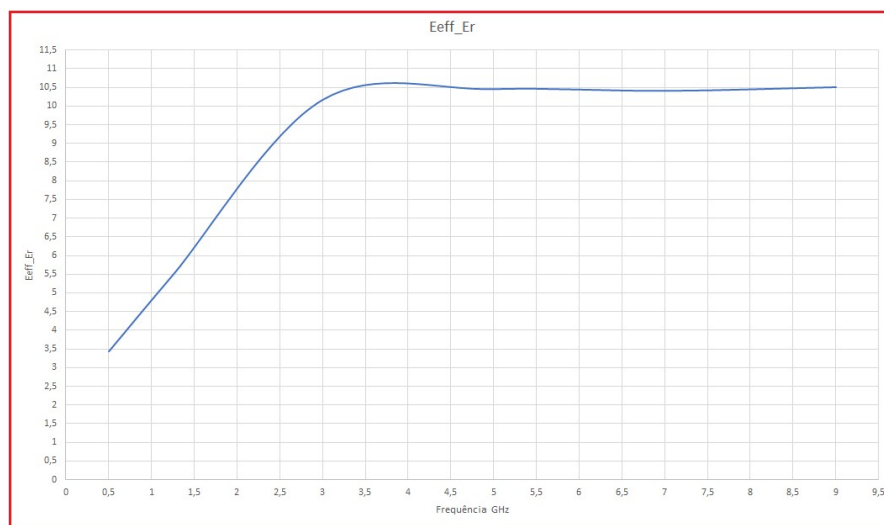


Figura 4. Permissividade efetiva x frequência.

Figura 4 descreve a permissividade efetiva do substrato para as frequências que estão entre 0,5 GHz até 9 GHz. É possível perceber que conforme se aumenta a frequência, a permissividade efetiva tende a se igualar à permissividade relativa do substrato, onde o fabricante descreve que para frequências de 8GHz à 10GHz a permissividade relativa é de 10.5. Segundo Pozar (2011); Balanis (2012), este fenômeno ocorre devido à maior concentração das linhas de campo elétrico no substrato e por isso se comporta mais como um meio homogêneo, que é representado pelo substrato.

Sendo assim, pode ser observado à partir da frequência de 3,5GHz até 9GHz, que a constante dielétrica efetiva caracterizada se iguala a constante dielétrica do substrato, com algumas pequenas variações neste intervalo, e que não são observadas nas frequências menores, que estão entre 0,5GHz e 3,5GHz. Tais variações podem ter sido geradas pelas inconformidades descritas anteriormente na etapa de fresagem, pois como os campos elétricos são mais confinados dentro do substrato, em maiores frequências, as imperfeições observadas ao longo da linha, vistas na Figura 3, podem gerar respostas diferentes, pois a equação requer a diferença de fase entre as linhas e como foi observado, elas não são homogêneas devido as rugosidades presentes no substrato.

Trabalhos realizados por Tude e Chiarello (1983), utilizando simulações pelo método de Monte-Carlo, para analisar o efeito de tolerâncias das linhas, relativo à permissividade efetiva, largura da linha, altura do substrato e impedância para diferentes situações e com valores aleatórios gerados por um algoritmo, forneceram dados que podem ser comparados com os resultados obtidos.

Com isso a Tabela 1, compara os valores de permissividade obtidas na caracterização do substrato utilizado, com os dados simulados à partir do método de Monte-Carlo utilizados no trabalho de Tude e Chiarello (1983) para o dielétrico DUROID de 10.5.

Tabela 1. Medidas da Permissividade efetiva do substrato RT DUROID 10.5

Permissividade efetiva para $\Delta w - 10\%$	Média	Mínima	Máxima	Desvio Padrão
Medidas após fresagem	7,110	7,024	7,164	0,070
Tude e Chiarello (1983)	6,966	6,752	7,187	0,096

Podemos perceber que a média dos valores obtidos para a simulação utilizando o método de Monte-Carlo realizados por Tude e Chiarello (1983), para diferentes larguras da linha, são de 6,966 e com desvio padrão de 0,096. Na caracterização do substrato utilizando o método de diferença de fase foi obtido uma média de 7,110, com desvio padrão de 0,070. Com isso podemos perceber que mesmo com os erros observados na etapa de fresagem descritas, os valores estão dentro dos valores aceitáveis para o projeto considerado.

Outro fator a se considerar é que os autores descrevem que as influências nas respostas relativas à altura do substrato, largura da linha e comprimento da mesma, são os fatores que mais influenciam nas tolerâncias da permissividade efetiva e na impedância da linha e que o processo de fabricação deve contemplar com precisão estes requisitos, para melhores resultados de projeto que utilizam linhas microstrip em circuitos mais complexos. Estes fatores foram observados durante a caracterização da placa, e demonstram a necessidade de observar e corrigir de forma precisa estas incoerências para projetos mais complexos e elaborados e que requerem elementos distribuídos no substrato.

4. Conclusão

O método de caracterização da permissividade efetiva utilizando a diferença de fase entre os sinais das linhas, demonstrou resultados satisfatórios para os objetivos propostos. Os dados relativos às medidas elétricas dos parâmetros S, descrevem o comportamento da permissividade para diferentes frequências e serve como base para sistemas que operam em microondas e dentro de um alcance de 500MHz a 9GHz.

A comparação dos resultados encontrados neste trabalho foram comparados com trabalhos anteriores que também utilizaram o substrato com permissividade efetiva de 10.5, dos autores Tude e Chiarello (1983), onde os valores apresentados vão de encontro com os resultados obtidos.

O trabalho realizado permitiu analisar erros durante o processo de desenvolvimento de estruturas que operam em frequências microondas. Os erros detectados permitem criar

condições de contorno para que as estruturas possam ser desenvolvidas para testes em bancada e que estejam mais próximas das condições esperadas.

Foram identificados erros na etapa de fresagem, onde o substrato demonstrou diferentes alturas não homogêneas ao longo da linha. Neste caso o erro pode ser atribuído a uma falta de calibração e ou manutenção da fresadora, no que tange a plataforma de fixação da placa.

Também foram verificados erros na largura (w) das linhas L1 e L2, comparado com o modelo projetado e simulado. Neste caso, em ambas as linhas as larguras medidas são quase idênticas, a diferença se dá em comparação com as medidas projetadas e simuladas. Isso indica que o erro pode ser eliminado ou reduzido fazendo-se ajustes na configuração da LPKF.

Para a devida análise devem ser consideradas as fontes de erros relativas as linhas desenvolvidas, onde o primeiro ponto a se avaliar são os erros relativos a imprecisão das medidas na linha, tanto da largura efetiva Weff, como na profundidade do substrato.

Para a obtenção de melhores resultados é necessário que os próximos projetos levem em consideração tais erros, onde a identificação à partir da caracterização fornece os ajustes necessários para que sejam reduzidos e ou eliminados, conferindo assim maior precisão nas medidas realizadas. Uma das possíveis soluções seria a requisição de ajustes e manutenção na LPKF, pois foi na etapa de fresagem que se constatou maior número de erros.

***Agradecimentos:** Aos colegas da Divisão de Eletrônica Espacial e Computação (DIEEC) pela motivação. A José Paulo, e ao José Pelogia, pelo empenho e colaboração na construção das placas, e também ao CNPQ pelo incentivo e financiamento do Projeto de Capacitação Institucional.*

Referências

- BALANIS, Constantine A. **Advanced engineering electromagnetics**. John Wiley & Sons, 2012.
- CHANG, Sheng-Hsiung et al. Determination of microwave dielectric constant by two microstrip line method combined with EM simulation. **Microwave and optical technology letters**, v. 48, n. 11, p. 2199-2201, 2006.
- DAS, Nirod K.; VODA, Susanne M.; POZAR, David M. Two methods for the measurement of substrate dielectric constant. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 35, n. 7, p. 636-642, 1987.
- POZAR, David M. **Microwave engineering**. John wiley & sons, 2011.
- TUDE, E. A. P.; CHIARELLO, M. G. **Análise de tolerâncias de uma linha em microstrip pelo metodo de monte carlo**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 1., 1983, Rio de Janeiro, BR. Disponível em: <ibi:6qtX3pFwXQZ3r59YCT/GTCNU>.
- VEGHTE, Richard L.; BALANIS, Constantine A. Dispersion of transient signals in microstrip transmission lines. **IEEE Transactions on microwave theory and techniques**, v. 34, n. 12, p. 1427-1436, 1986.