

PROJETO E ANÁLISE DE UM FILTRO DE MICROFITA COM LINHAS ACOPLADAS E COM DEFORMAÇÕES PERIÓDICAS (DGS) NO PLANO DE TERRA

Rodrigo César Fonseca da Silva¹

Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira²

Pedro Carlos de Assis Júnior³

Tales Augusto Carvalho De Barros⁴

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a melhoria da performance de um filtro de microfita com linhas ressoadoras acopladas proporcionada pelo acréscimo de deformações periódicas em seu plano de terra. Apresentamos os resultados completos do projeto deste filtro de microfita com plano de terra DGS, com a verificação das bandas de frequências permitidas e proibidas através da observação dos parâmetros S, são eles: coeficientes de reflexão ($|S_{11}|$) e de transmissão ($|S_{12}|$), em uma varredura em uma faixa de frequências variando de 100 MHz a 14,5 GHz. O filtro de microfita idealizado foi excitado pela técnica de linha de microfita e posteriormente analisado no simulador de onda completa *Ansoft Designer*TM. O seu comportamento em frequência foi estudado a partir de algumas simulações e um protótipo do dispositivo com melhor desempenho foi construído e medido em um analisador de rede vetorial com a finalidade de corroborar os resultados teóricos do filtro de microfita proposto. Os resultados simulados e medidos experimentalmente são apresentados e discutidos.

Palavras-chave: Filtros de microfita. Plano de terra DGS. Bandas de frequência.

¹ Doutor em Física. Atualmente é professor adjunto da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB.

² Doutor e Engenharia Elétrica. Atualmente é professor adjunto da Universidade Estadual da Paraíba.

³ Doutor em Física. Atualmente é professor adjunto da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB.

⁴ Graduando em Física pela Universidade Estadual da Paraíba – UEPB.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os filtros de microfita modernos se destacam por suas características fundamentais para o desenvolvimento tecnológico: o seu espectro eletromagnético e condições favoráveis para o desenvolvimento da pesquisa, pelo baixo custo do material, dimensões e peso reduzidos, facilidade de fabricação. Estes filtros de microfita podem ser utilizados em diversos sistemas de transmissão de dados que estão em constante avanço em todo planeta, destacando-se a notável parcela que condiz à comunicação sem fio em telecomunicação, onde podemos citar a tecnologia WiFi (do inglês *Wireless Fidelity*) na frequência de 2,44 GHz. As tecnologias, que vão desde o 3G a 5G, estão evoluindo e sendo disseminadas em larga escala pelo mundo demandando soluções ao mesmo tempo em que melhoram serviços que abrangem desde os setores comerciais, militar e até mesmo aparelhos domésticos com dimensões menores.

Denomina-se microfita, uma estrutura cuja composição consiste em uma cavidade preenchida por um dielétrico, limitada por um plano de terra e uma fita metálica (BALANIS, 1997). A distância entre as microfitas tem como o propósito a atenuação de determinadas frequências do espectro do sinal de entrada ao mesmo tempo em que dá passagem para outras. Em muitas aplicações, apenas uma faixa exclusiva de frequências tem real interesse e assim, foram desenvolvidos dispositivos passivos, ou seja, os filtros de alta frequência, que têm como finalidades fundamentais a seleção e/ou eliminação de sinais com bandas de frequências diferentes. Nesse sentido, os filtros de microfita apresentam um papel bastante relevante nos dispositivos sem fio de rede e telefonia celular, algo que vem estimulando cada vez mais a miniaturização de dispositivos dessa natureza (PARK et al., 1999).

As propriedades das linhas de microfita têm despertado bastante interesse dos pesquisadores devido às suas propriedades. Diversos estudos de estruturas periódicas, aberturas, fendas ou defeitos no plano de terra já foram realizados, tais como: *photonic band gap* (PBG), *ground plane aperture* (GPA) e *defected ground structure* (DGS); sempre partindo do princípio que os filtros de microfita estão interligados com os casamentos de impedância e com técnicas pioneiras desenvolvidas para a caracterização dos filtros por meio de novos arranjos e geometrias, o que delimita a frequência central e sua largura de banda. Em estudos mais recentes destacam-se os filtros planares, como resposta de banda passante dupla, que se utiliza de ressoadores com impedâncias do tipo

degrau (SIR – *Stepped Impedance Resonator*); multicamadas de filtros de microfita, que apresentam um conjunto de linhas acopladas; filtros de microfita que apresentam linhas acopladas paralelas em banda larga; projetos de filtro de microfita tríplex, com uma carga de acoplamento intensa; filtro de microfita baseado num ressonador indutivo de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda (CHEN et al., 2006).

Assim, como uma contribuição para impulsionar novas pesquisas e estudos na grande área do Eletromagnetismo Aplicado, neste trabalho serão discutidos os resultados numéricos e experimentais de um filtro de microfita, que além do *design* inovador, apresenta uma superfície seletiva em frequência, o plano de terra com deformações do tipo DGS (*Defect Ground Estruture*) e fitas acopladas. Na seção II deste artigo, discutiremos a teoria dos filtros em geral e deformações DGS. Na seção III, apresentaremos a simulação do filtro obtida no simulador de onda completa, *Ansoft DesignerTM*. Por fim, a comparação dos resultados teórico e experimental está disposta na seção IV e a seção V é destinada para as conclusões.

2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO: CONCEITOS BÁSICOS DOS FILTROS

Definimos como filtros uma rede composta de duas portas que apresenta um conjunto de elementos de armazenamento de energia, que podem ser indutores, capacitores e linhas de transmissão (CHEN et al. 2003). Tais dispositivos tem como finalidade a obtenção de frequências características dependentes, garantindo a transmissão de sinais requeridos em uma determinada banda de passagem ao mesmo tempo em que rejeitam ou atenuam na chamada banda de rejeição. Este comportamento pode ser obtido por meio das mais diversas associações de capacitores e indutores. Verifica-se que blocos de capacitores DC bloqueiam baixos níveis de frequências ao mesmo tempo em que dão passagem para frequências mais altas. Já os indutores apresentam características opostas às dos capacitores, uma vez que bloqueiam as frequências mais altas permitindo que baixas frequências passem por eles. Estes elementos recíprocos possibilitam diferentes configurações e a classificação de quatro tipos diferentes de filtros: Filtro Passa Baixa (LPF), onde há a passagem de frequências localizadas abaixo de uma determinada frequência de corte e o bloqueio das demais frequências; Filtro Passa Alta (HPF), onde há a passagem de frequências acima de uma determinada frequência de corte e o consequente bloqueio das demais frequências; Filtro Rejeita Banda (BSF), caracterizado pelo bloqueio de uma banda de frequências,

determinada pelas frequências de corte superior e inferior, ao mesmo tempo que permite que todas as outras frequências passe por ele; Filtro Passa Banda (BPF), com o comportamento oposto ao BSF, permite a passagem de uma banda de frequências, determinadas pelas frequências de corte superior e inferior, rejeitando todas as demais frequências. Devido a todas estas especificações, os filtros demandam muito rigor e atenção para o cumprimento dos requisitos de sua implementação, tais como: a seletividade de frequência, tamanho, peso, confiabilidade e desempenho em vários ambientes diferentes.

Do ponto de vista matemático, as funções de transferência, $T(s)$, são ferramentas que governam a análise de sistemas, geralmente nas áreas de comunicação, processamento de sinais e controle, onde s é uma variável complexa. É uma categoria de funções que se refere a sistemas lineares, invariantes no tempo (LTI). Geralmente, sistemas reais são não lineares. Porém, muitos deles, quando operam dentro dos parâmetros nominais apresentam um comportamento suficientemente linear para que a teoria LTI possa ser utilizada como uma representação aceitável do comportamento do dispositivo. Para um sinal de entrada contínuo no tempo, $x(t)$, e um sinal de saída também contínuo no tempo, $y(t)$, a função de transferência é um mapeamento linear da Transformada de Laplace de entrada, $X(s) = L\{x(t)\}$, na Transformada de Laplace de saída, $Y(s) = L\{y(t)\}$, tal que: $Y(s) = T(s)X(s)$, em um conjunto de operações que ocorrem em um bloco fechado, tal como representado na Figura 1.



Figura 1 – Esquema geral de um filtro.

No que se refere ao plano de terra dos filtros de microfita, estruturas eletromagnéticas com lacunas na banda de condução (*Band Gap*), tais como defeitos e estruturas periódicas com *gap* fotônico (PBG), são de grande interesse neste estudo. Inicialmente, as PBGs foram pesquisadas em frequências ópticas com uma vasta gama

de aplicações como lasers, antenas e outros dispositivos. Entretanto, as PBGs são de difícil implementação em componentes de micro-ondas e ondas milimétricas, o que se deve, principalmente, às dificuldades na modelagem e à preocupação com a radiação que surge a partir dos defeitos periódicos.

Uma estrutura com Deformações no Plano de Terra (DGS) é semelhante às estruturas fotônicas com *gap* e é um conceito introduzido no final da década de 90, por Park et. al (1999). Apresenta como principal vantagem a redução da área do circuito, que se torna relativamente pequena com esta técnica, quando comparada com uma PBG. Além disso, alguns elementos DGS podem atingir parâmetros similares a uma PBG periódica, podendo mostrar efeitos de ondas lentas e o encadeamento de células unitárias pode atingir as bandas de rejeição mais profundas, a depender do número de células utilizadas no desenvolvimento dos projetos. As deformações DGS podem fornecer alta seletividade à frequência de corte e excelente desempenho em termos de sinais espúrios na banda de rejeição e ondulações na banda de passagem, podendo também ser utilizadas para suprimir harmônicos. A Figura 2 mostra a caracterização de um filtro de microfita, consolidado na literatura, e apresenta as vistas superior e inferior, bem como a mudança da distribuição de corrente no plano de terra provocada pela deformação DGS.

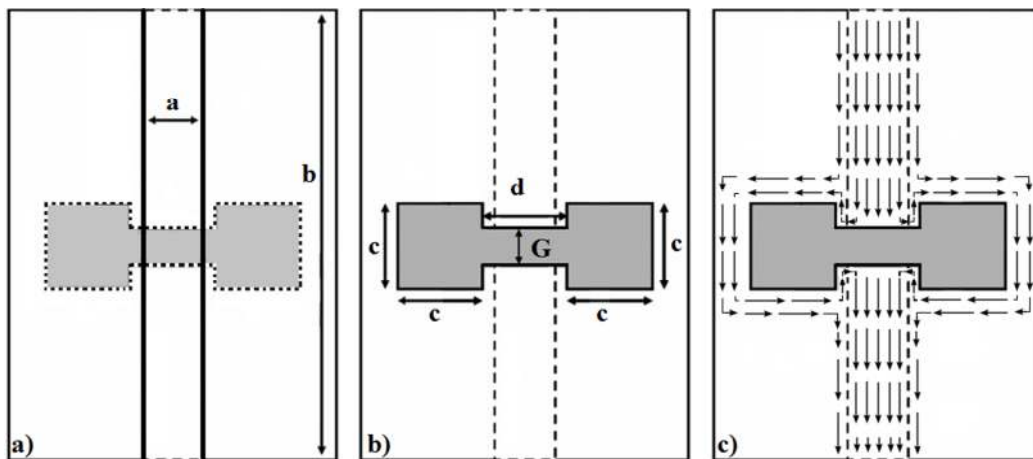


Figura 2 – Esquema simplificado de um filtro com uma deformação DGS: a) Visão superior – Linha de alimentação de microfita. b) Plano de terra deformado. c) Visão da distribuição de corrente provocada pela deformação DGS.

3 RESULTADOS NUMÉRICOS

O uso de geometrias mais complexas em filtros de microfita, com difícil tratamento matemático, têm impulsionado o desenvolvimento de *softwares computacionais* que possam simular numericamente estes dispositivos com cada vez mais precisão. Na obtenção dos resultados teóricos deste trabalho, fizemos uso do *Ansoft DesignerTM*, que implementa o método dos momentos (MOM) na análise precisa do comportamento eletromagnético do filtro projetado e assim foi possível estabelecer as relações entre as frequências de ressonância e os parâmetros geométricos estabelecidos (o chamados parâmetros de espalhamento S). Este simulador possui um tempo de resposta razoavelmente pequeno com erros percentuais aceitáveis, quando comparados com os resultados experimentais, na sua maioria, inferiores a 5%. Neste trabalho fez-se necessário uma comparação, via simulação computacional, entre três diferentes configurações para o plano de terra que deverá compor o protótipo do filtro de microfita proposto. O intuito foi verificar as melhorias no desempenho provocadas pela inserção de deformações DGS no plano de terra do filtro. A primeira configuração representa o filtro batizado como Modelo 1, com o plano de terra totalmente uniforme, isto é, que não apresenta nenhum defeito gravado na placa que possa alterar sua distribuição de corrente, conforme ilustra a Figura 3(a). As outras duas configurações, Figuras 3(b) e 3(c), formam uma grade retangular periódica gravada no plano de terra, que perturba a atual distribuição de corrente, que por sua vez depende da forma e dimensões dos defeitos inseridos. Isso altera o aumento da indutância e capacitância da linha, pois a propriedade do *gap* depende de muitos parâmetros de projeto, tais como a forma da estrutura, espaçamento e o número de redes.

Esquemáticamente, temos um filtro de microfita com linhas ressoadoras acopladas desenvolvido neste artigo. Nas linhas de alimentação estão localizadas as portas P_1 e P_2 . Entre essas linhas, temos duas linhas ressoadoras de espessuras diferentes. O filtro possui as dimensões absolutas $L = 96,40 \text{ mm}$ (largura) e $H = 30,80 \text{ mm}$ (altura) e os conectores das portas P_1 e P_2 são de 50Ω . O lado menor das fitas 1 e 4 está afastado da borda mais próxima por uma distância de $16,11 \text{ mm}$, enquanto que o lado menor das fitas 2 e 3 está afastado das bordas mais próximas por uma distância de $5,37 \text{ mm}$. As dimensões se encontram resumidas na Tabela 1.

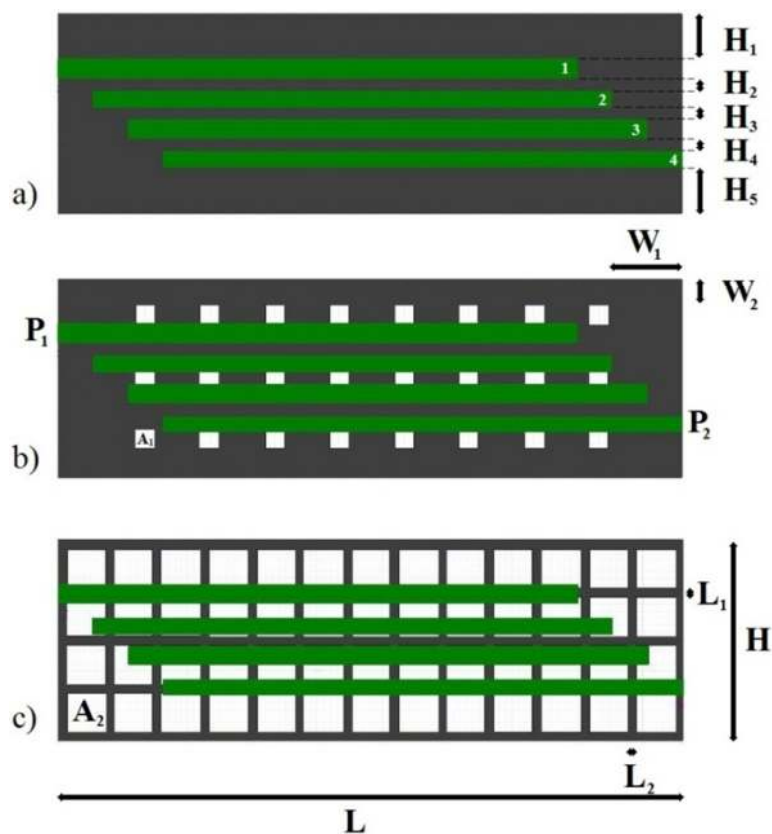


Figura 3 - a) Modelo 1: Visão superior do filtro com fitas ressoadoras e plano de terra sem deformações. b) Modelo 2: Plano de terra com deformações periódicas simples. c) Modelo 3 (protótipo que foi construído): Plano de terra com deformações mais acentuadas.

Tabela 1 – Conjunto completo de medidas dos filtros estudados

Dimensões das linhas de microfita (mm)								
Linha			Largura			Comprimento		
1			2,87			80,00		
2			2,50			80,00		
3			2,87			80,00		
4			2,50			80,00		
Dimensões do plano de terra com deformações (mm)								
H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	W ₁	W ₂	L ₁	L ₂
6,88	2,00	2,00	2,00	6,88	11,90	4,25	1,38	1,38
Área da deformação (mm ²)								
A ₁					9,00			
A ₂					36,00			

Dá-se o nome de coeficiente de reflexão ($|S_{11}|$) ao parâmetro S referente à medição da energia que é refletida pela porta de entrada do filtro. A verificação dessa grandeza é de suma importância, pois nos dá uma ideia do quanto de energia está voltando ao gerador, e dessa forma investigar através de outro parâmetro o quanto de energia será transmitida pelo dispositivo antes de partirmos para a finalização de um projeto, permitindo a maximização de seu desempenho.

A Figura 4 mostra a resposta do coeficiente de reflexão simulado em dB (Decibéis) para os três filtros propostos, em uma frequência de varredura que se inicia em 1 GHz e finaliza em 10 GHz. Observamos vários pontos de ressonância, valores menores que -10 dB, induzindo um comportamento característico de multibanda. Esse resultado também mostrou valores de frequências que operam abaixo da faixa de eficiência de irradiação característica das antenas, que corresponde a -10 dB.

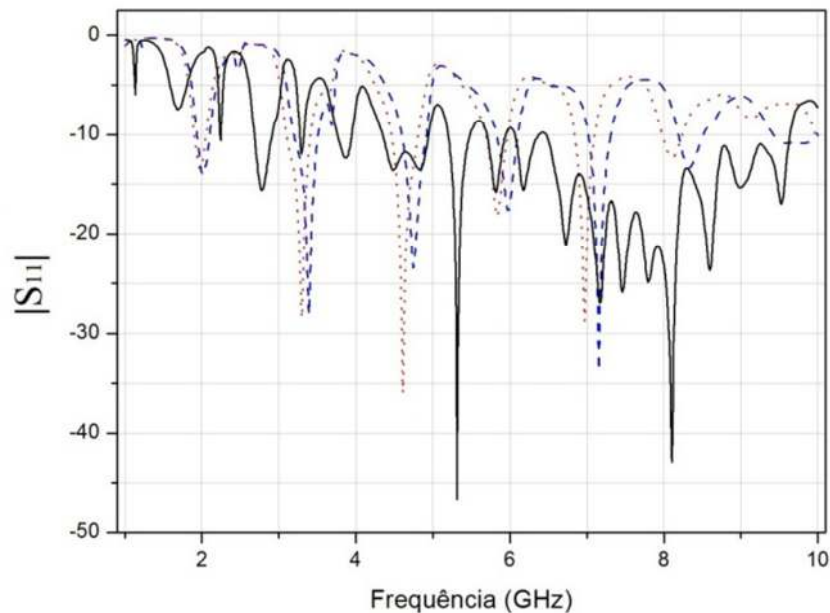


Figura 4 – Resposta do coeficiente de reflexão ($|S_{11}|$) simulado. Modelo 1: Linha tracejada. Modelo 2: Linha pontilhada. Modelo 3: Linha sólida.

A resposta simulada para o coeficiente de transmissão dos três modelos de filtros, resultado que pode ser visualizado na Figura 5, na qual apresenta bandas de frequência que podem ser classificadas como bandas passantes ou de rejeição. Consideramos a região de maior interesse dentro da banda de frequência entre 1 GHz a 5,0 GHz. Para valores acima de 5,0 GHz temos a predominância da banda passante e apenas no Modelo 3 temos uma região rejeita banda, entre 8,4 GHz a 9,1 GHz. Os três

modelos apresentam bandas passantes ou de rejeição entre 1,0 GHz e 5,0 GHz alterando-se entre si, à medida que foram introduzidos os defeitos no plano de terra.

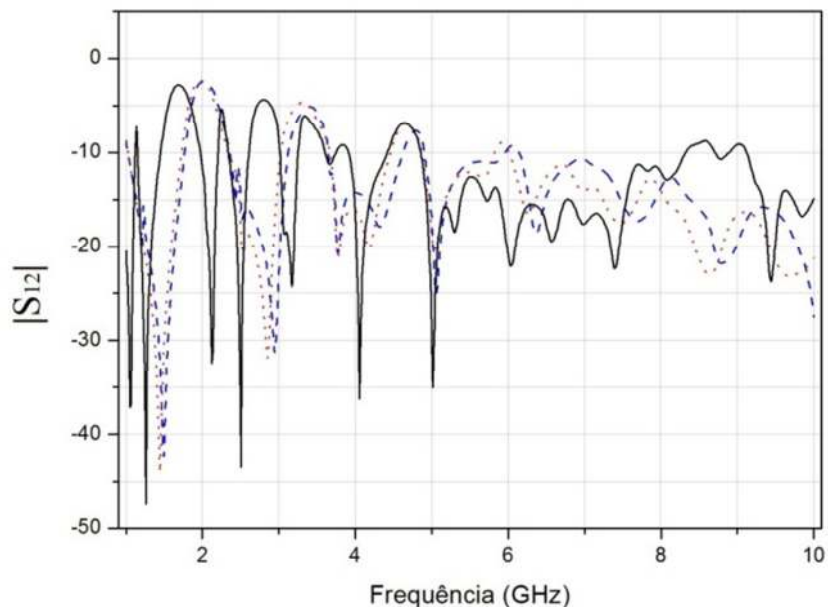


Figura 5 – Resposta do coeficiente de transmissão ($|S_{12}|$) simulado.

Modelo 1: Linha tracejada. Modelo 2: Linha pontilhada. Modelo 3: Linha sólida.

A Figura 6, mostra de forma mais clara o resultado da simulação da Figura 5 dentro da faixa de frequência de 1 a 5,0 GHz, onde as deformações no plano de terra no Modelo 2 não alteraram significativamente seu resultado em relação ao Modelo 1.

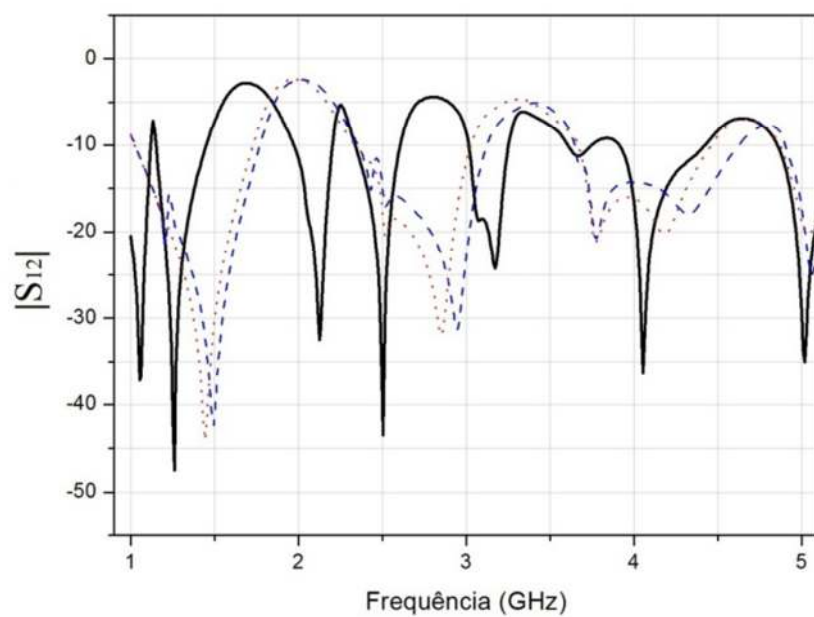


Figura 6 – Resposta do coeficiente de transmissão ($|S_{12}|$) simulado dentro da faixa de 1 a 5,0 GHz. Modelo 1: Linha tracejada. Modelo 2: Linha pontilhada. Modelo 3: Linha sólida.

É possível estabelecer uma relação entre a região passa banda ou rejeita banda de acordo com os defeitos periódicos no plano de terra. Nos Modelos 1 e 2 temos uma banda passante entre 2,35 GHz até 3,0 GHz, depois de 3,7 GHz até 4,5 GHz; enquanto no Modelo 3 a banda passante ocorre 1,9 GHz até 2,2 GHz, depois de 3,0 GHz até 3,3 GHz. Notamos claramente alterações nas bandas passantes devido às deformações no plano de terra. Conseqüentemente, as bandas de rejeição também se alteram na mesma proporção.

Verificamos assim, que o filtro, caracterizado por uma quantidade maior de deformações, tem o melhor desempenho por apresentar um número maior de multibandas. Um protótipo foi projetado a partir do filtro batizado como Modelo 3, ver Figura (3c), para a frequência de 2,45 GHz e em seguida construído, conforme ilustra a Figura 7.

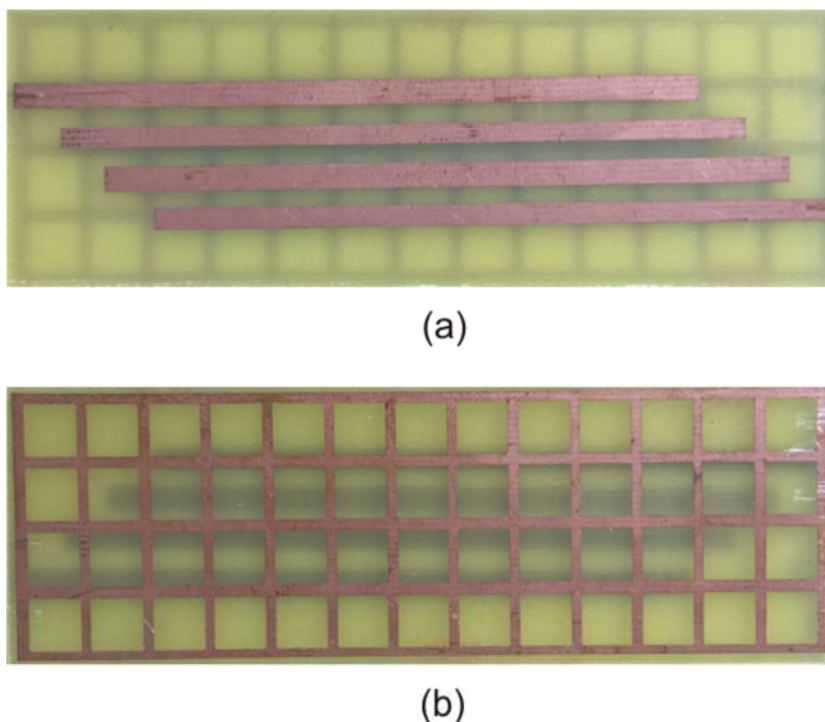


Figura 7 – Filtro construído baseado no modelo 3: (a) vista superior (b) vista inferior - plano de terra.

O método utilizado para obtenção dos defeitos no plano de terra e das linhas de microfita foi à corrosão utilizando ácido perclorato de ferro, em um processo que durou em torno de vinte minutos. Uma máscara adesiva que foi colocada na placa de circuito de fibra de vidro revestida por duas finas camadas de cobre em face dupla. As

características da placa de FR4 são: permissividade elétrica relativa de $\epsilon_r = 4,4$ e espessura $1,5 \text{ mm}$.

Os resultados experimentais para o filtro da Figura 7 foram obtidos por um analisador de rede vetorial modelo R&S S5071C. Foram obtidos o coeficiente de reflexão ($|S_{11}|$) e o coeficiente de transmissão ($|S_{12}|$), para uma varredura de frequência variando entre 1,0 GHz a 10 GHz, sendo que esse resultado pode ser visualizado nas Figuras 8 e 9, respectivamente. Para valores acima de 5,0 GHz o filtro comporta-se predominantemente como rejeita faixa. Por sua vez, Para valores entre 100 MHz e 5,0 GHz observamos regiões com multibandas do tipo passante e de rejeição.

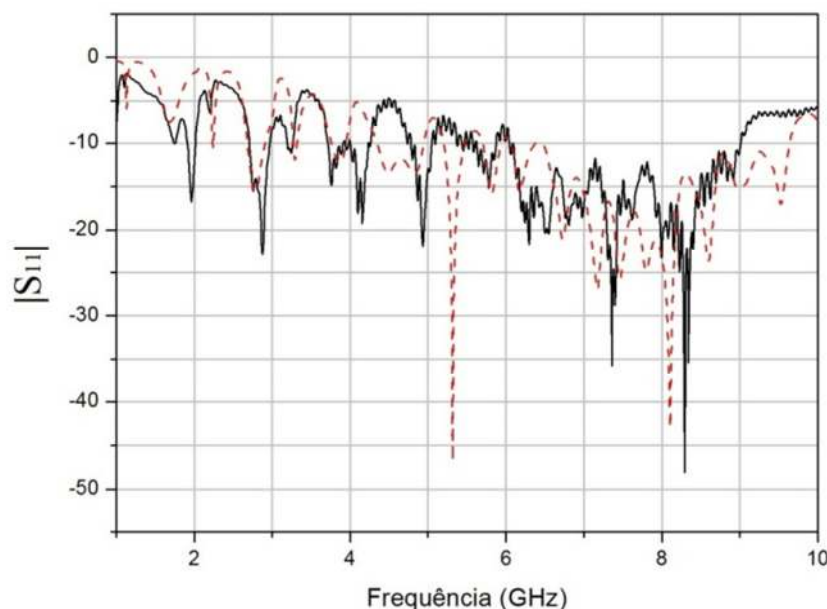


Figura 8 – Resposta do coeficiente de reflexão para o modelo 3: Simulado (Linha tracejada) e medido (Linha sólida).

Nesse sentido, esse filtro apresenta bandas de frequências proibidas e permitidas, em particular para a frequência de 2,45 GHz que corresponde a um valor de frequência dentro da banda proibida. Esse resultado se mostra interessante, uma vez que é nessa frequência que temos aplicações em redes sem fio, e nesse contexto filtrar essa frequência impossibilitará certas aplicações nessa faixa, como por exemplo, bloquear o sinal de celular dentro dos presídios.

Na Figura 9, percebemos uma leve discrepância do resultado simulado em relação ao resultado experimental, contudo o erro envolvido no projeto é considerado dentro dos limites aceitáveis. Para valores acima de 5 GHz o filtro comporta-se

predominantemente como passa faixa. Para valores entre 100 MHz e 5 GHz observamos regiões com multibandas do tipo passante e de rejeição. No contexto geral, esse filtro apresenta bandas de frequências proibidas e permitidas que possam ser controladas a partir dos defeitos no plano de terra. É possível construir o filtro que controle a frequência de 2,45 GHz, tornando essa uma região de banda passante ou de banda proibida.

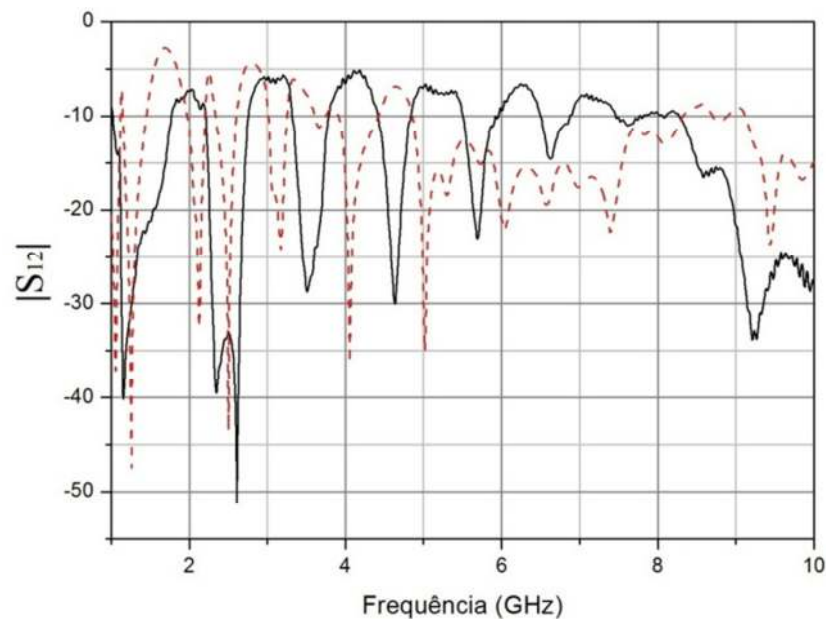


Figura 9 – Resposta do coeficiente de transmissão ($|S_{12}|$) para o protótipo construído: simulado (Linha tracejada) e medido (Linha sólida).

4 CONCLUSÃO

Foram estudadas 3 (três) configurações de planos de terra DGS diferentes, neste trabalho, com o objetivo de verificar a melhoria do desempenho que a aplicação dos defeitos periódicos causaria na operação de um protótipo de filtro de microfita com linhas ressoadoras acopladas. Ao fim da simulação e comparação do desempenho teórico, verificou-se qual modelo de plano de terra é o mais eficiente e um protótipo do filtro de microfita foi construído e submetido à análise. Os resultados numéricos experimentais para os coeficientes de retorno e transmissão foram obtidos por meio de um analisador de rede vetorial, que tem como base programadora o método dos momentos. Os valores medidos experimentalmente foram comparados com os simulados e apresentaram grande semelhança, com uma margem de erro experimental inferior a 1% decorrente da manipulação dos materiais utilizados na construção do

protótipo, permitindo identificar as regiões passa banda e rejeita banda. Observamos, no filtro de melhor desempenho (denominado de Modelo 3), bandas permitidas (passagem) e proibidas (rejeição) entre as frequências de 1,0 GHz à 5,0 GHz. Para valores acima de 5,0 GHz o filtro comporta-se predominantemente como um filtro passa banda. Os defeitos no plano de terra permitem controlar as regiões passante ou de rejeição. Em particular, para a frequência de 2,45 GHz, faixa muito usada em sistema de comunicação sem fio, corresponde a uma região dentro da banda passante no filtro Modelo 3.

AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho agradecem ao CNPq sob o convênio 472098/2013-6 e a CAPES pelo suporte financeiro parcial.

REFERÊNCIAS

BALANIS, Constantine. **Antenna theory-analysis and design**. 2. Ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

CASIMIRO, A. et al. **Método dos Momentos**. Faculdade de Ciência e Tecnologia – Universidade do Algarve, Algarve, Portugal.

CHEN, W. N. et al. **Microstrip Coupled-Line Bandpass Filter With a Multilayer**. *Microwaves and Optical Technology Letters*, Vol. 39, 2003.

CHEN, C. C. et al., **Study of Parallel Coupled-Line Microstrip Filter in Broadband**. *Microwaves and Optical Technology Letters*, Vol. 48, 2006.

SHARMA, R. et al. **Characteristic Impedance of a Microstrip-Like Interconnect Line in Presence of Ground Plane Aperture**. *International Journal of Microwave Science and Technology*, Vol. 1, pp. 1-5, 2007.

PARK, et al. **Modeling of a Photonic Bandgap and its Application for the Low-Pass Filter Design**. *Asia Pacific Microwave Conf. Proc. APMC*, Vol. 2, p. 331-334. 1999.

WEI, C. et al. **Desing of Triple-Mode Microstrip Filter With Source-Load Coupling**. *Microwaves and Optical Technology Letters*, Vol. 53, 2011.

Ansoft Designer (part of ANSYS Inc.) [Online]. Available: www.ansoft.com.

QAIN, Y. et al. Characteristics of Microstrip Lines on a Uniplanar Compact PBG Ground Plane, in Asia-Pacific Microwave Conf. Dig., pp.589-592, Dec. 1998.

AHN, D. et al. A Design of the Low-Pass Filter Using the Novel Microstrip Defected Ground Structure, in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 49, No.1, January 2001.

LIM, J. S. et al. Desing of Lowpass Filters Using Defected Ground Structure and Compensated Microstrip Line. eletronics letters, vol. 38, n° 22, pp. 1357-1358, octuber 2002.