

# Filtro Compacto Circular de Microfita Modificado com Fendas Hiperbólicas para Controle de Banda de Passagem

Rodrigo César Fonseca da Silva, Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira, Glauco Fontgalland, Tales Augusto Carvalho de Barros e Isrrael Medeiros Pires de Almeida

**Resumo** — Este trabalho apresenta o projeto de um filtro circular compacto em microfita com fendas hiperbólicas introduzidas no patch ressonador, que lhe dão características de multibandas, adequadas para aplicações em sistemas de banda ultra larga. Resultados numéricos e experimentais para os coeficientes de reflexão ( $|S_{11}|$ ) e de transmissão ( $|S_{12}|$ ) foram obtidos para a faixa de micro-ondas. Foram realizadas simulações no software comercial Ansoft Designer™ com o intuito de se investigar seu comportamento em frequência. Um protótipo foi fabricado, caracterizado experimentalmente e os resultados são apresentados e discutidos. A boa concordância entre eles foi observada, validando este projeto de filtro proposto.

**Palavras-chave:** filtro de microfita, fendas hiperbólicas, bandas de frequência.

**Abstract** — This work presents a circular compact microstrip filter with hyperbolic slits in the patch resonator, which give it multiband characteristics, suitable for applications in ultra wideband systems. Results for the reflection coefficients ( $|S_{11}|$ ) and transmission coefficients ( $|S_{12}|$ ) within the microwave range were obtained. The simulations were made using commercial software Ansoft Designer™ in order to investigate their behavior in frequency. A prototype was constructed, measured and the results were presented and discussed. A good agreement between them was observed and the proposed filter design was validated.

**Keywords:** microstrip filter, hyperbolic slits, frequency bands.

## I. INTRODUÇÃO

Os filtros seletores de frequência de microfita modernos são dispositivos eletrônicos que se destacam por suas características fundamentais para o avanço tecnológico: espectro eletromagnético bem definido, condições favoráveis para o desenvolvimento da pesquisa, baixo custo do material, dimensões, peso reduzidos e facilidade de fabricação [1]. Esses filtros de microfita possuem a propriedade de selecionar ondas transmitidas em determinadas frequências e podem ser utilizados em diversos sistemas de transmissão de dados, em pleno avanço nos dias de hoje. Um destaque notável pode ser dado à comunicação sem fio nos atuais sistemas de telecomunicações, no qual podemos citar o WiFi e as demais tecnologias de 3G e acima que estão em constante evolução e sendo disseminadas em larga escala pelo mundo. Essas tecnologias demandam soluções que permitam oferecer melhores serviços abrangendo desde os setores comerciais, militar e até mesmo aparelhos domésticos [2].

Em telecomunicações, a geometria dos ressonadores, que dão forma aos dispositivos eletrônicos, é de extrema importância e tem motivado cientistas à pesquisa e construção de dispositivos eletrônicos com novos arranjos geométricos periódicos, fractais, etc. [3] – [5]. É mostrado na referência [6] que um ressonador quadrado de microfita pode exibir características de filtro pela impressão de estruturas periódicas no plano de terra, com alguns defeitos. Fendas triangulares já foram utilizadas para modificar ressonadores e obtenção da miniaturização dos dispositivos explorando o efeito de onda lenta [7], entre outros exemplos.

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo experimental sobre a variação do comportamento das bandas de frequências proibidas obtida com o desenvolvimento de um filtro circular compacto de microfita, com o acréscimo de fendas de formato hiperbólico, que controlam a área total do dispositivo e funcionam como um seletor de bandas de frequências. Com a adição das fendas, o filtro proposto neste artigo adquire características de multibandas com potenciais aplicações em UWB (Ultra WideBand - 3,1 GHz até 10,6 GHz) e na faixa não-comercial ISM (IEEE *Industrial, Scientific and Medical Band* – 2,4 GHz).

Este artigo está dividido da seguinte forma: na seção II é apresentado o desenvolvimento teórico-experimental deste trabalho; a seção III é destinada ao tratamento de dados simulados e experimentais obtidos na construção dos protótipos; as considerações finais a respeito do projeto do filtro circular são apresentadas na seção IV, destinada às conclusões do trabalho.

## II. DESENVOLVIMENTO

Graças a sua simplicidade, o *patch* ressonador de microfita de formato circular é utilizado em projetos de micro-ondas [7], devido à sua resposta estável [8] – [10], e desde meados dos anos 80, as ressonâncias não irradiantes do patch circular ganharam muita atenção devido à sua capacidade de fornecer ampla largura de banda de micro-ondas. A simetria circular apresenta outras vantagens como compacidade, versatilidade, bem como a capacidade de excitar várias ressonâncias em uma única peça. O modo ressonante dominante de um disco ressonador, sem deformações em sua superfície, pode ser calculado, aproximadamente, usando paredes magnéticas perfeitas, pela relação [11]

Rodrigo C. F. da Silva, Elder E. C. de Oliveira, Glauco Fontgalland, Universidade Federal da Paraíba (UFCG). Isrrael M. Pires de Almeida, Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Tales A. C. de Barros, Instituto Federal da Paraíba (IFPB). Emails: r.c.fonseca@uepb.edu.br, elder2@ymail.com, fontgalland@dee.ufcg.edu.br, ofc.isrrael@gmail.com, talesfisica@gmail.com.

$$F_{110} = \frac{1,841 c_o}{2\pi R\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

em que  $c_o$  é a velocidade da luz no vácuo,  $R$  é raio do disco e  $\epsilon_r$  é a constante dielétrica do substrato utilizado no desenvolvimento deste trabalho. Na Figura 1 é mostrado o esquema utilizado na concepção do projeto. Em destaque, temos a linha de alimentação de microfita acrescida a estrutura do patch circular, onde serão colocados os conectores tipo SMA.

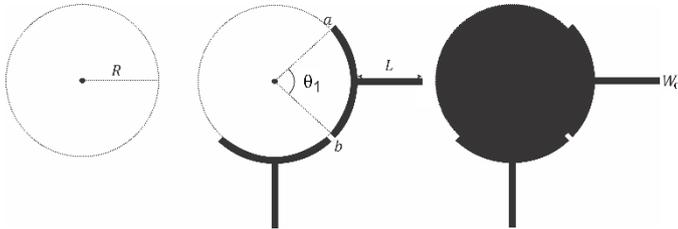


Fig. 1. Processo de desenvolvimento do filtro circular. Parâmetros:  $R=6,5\text{mm}$ ,  $a=0,5\text{mm}$ ,  $b=0,5\text{mm}$ ,  $L=5,5\text{mm}$ ,  $\theta_1=85,75^\circ$  e  $W_0=0,5\text{mm}$ .

A proposta deste estudo experimental é gerar modos degenerados com a inserção de defeitos no patch circular, sem modificar sua simetria geral. Na Figura 2 temos a descrição de como realizar cortes com formato hiperbólico na superfície metálica superior do filtro. A estrutura é montada a partir de uma placa quadrada de 2,5 cm de lado de FR4 (fibra de vidro de 1,5mm de espessura, dielétrico com 0,5mm de espessura e  $\epsilon_r = 4,4$ ) simulada com plano de terra finito e uniforme.

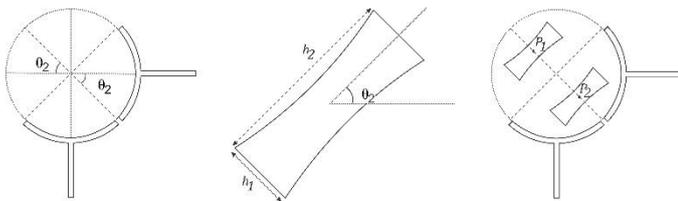


Fig. 2. Esquema de construção das deformações hiperbólicas da parte superior do filtro. Parâmetros:  $h_1=2,5\text{mm}$ ,  $h_2=6,8\text{mm}$ ,  $\theta_2=45^\circ$  e  $r=2,1309\text{mm}$ .

Substituindo os valores dos parâmetros na Equação (1), obtemos o modo dominante,  $F_{110} \approx 6,44697$  GHz, do filtro sem deformações. Usamos este parâmetro para comparação, após a verificação de todas as variações de filtros simulados mudando o posicionamento das hipérbolas nos pontos  $P_1$  e  $P_2$ .

O primeiro modelo simulado corresponde à versão com o ressonador circular totalmente uniforme. Utilizamos o software comercial Ansoft Designer™ [12], cuja base computacional é o Método Numérico dos Momentos (MOM), para estudar o seu comportamento em frequência, com a verificação dos parâmetros eletromagnéticos: coeficientes de reflexão, ou perda de retorno ( $|S_{11}|$ ) e o coeficiente de transmissão, ou perda de inserção ( $|S_{12}|$ ), denominações usuais na descrição de desempenho de filtros. Na Figura 3 é mostrado que esse primeiro modelo apresenta o modo dominante em  $F_{110} \approx 6,27497$  GHz (2,7% de diferença, em relação ao valor teórico  $F_{110}$ ) e uma largura de banda proibida de  $L_B = 9,27510 - 2,49927 = 6,775832$  GHz.

Essas características implicam em possíveis aplicações em sistemas de comunicações UWB, conforme a licença livre

aprovada pelas Comissões Federais de Comunicação (FCC), para a faixa de frequência (3,1 – 10,6) GHz e densidade de potência espectral limitada a  $-41,3$  dBm/MHz.

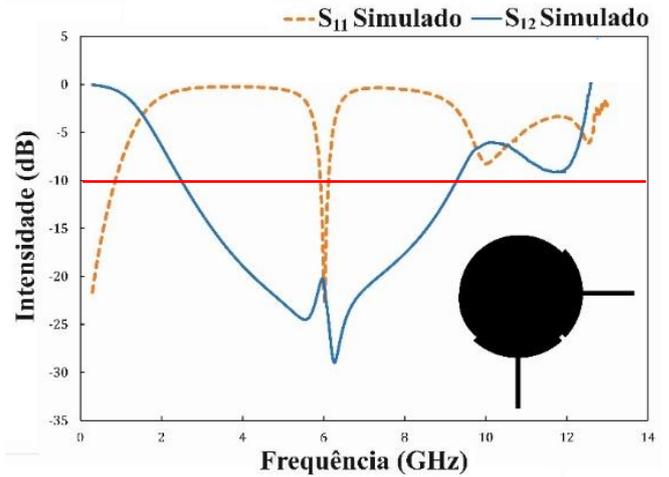


Fig. 3. Gráficos simulados de  $|S_{11}|$  e  $|S_{12}|$  para o filtro circular uniforme.

O detalhe que deve ser levado em conta no filtro circular uniforme, apresentado na Figura 3, é o sinal transmitido, representado pela linha tracejada. Os próximos modelos são uma proposta para melhorar seu comportamento em frequência, eliminado este sinal transmitido.

O segundo modelo, apresenta um defeito hiperbólico no ponto  $P_1$  ( $r=2,1309\text{mm}$ ), conforme mostrado na Figura 4.

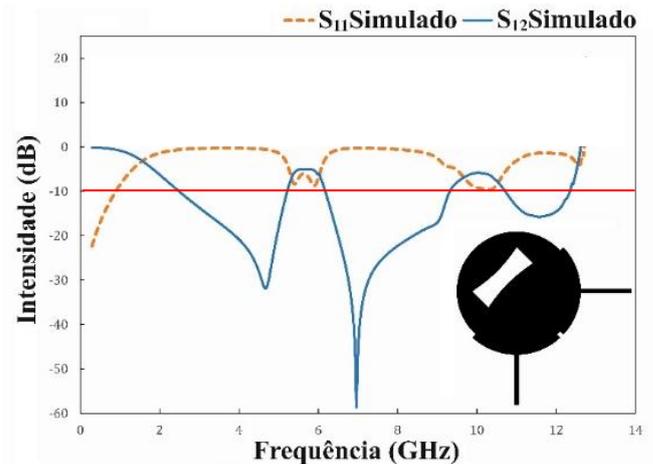


Fig. 4. Gráficos simulados de  $|S_{11}|$  e  $|S_{12}|$  para o filtro circular com uma fenda hiperbólica localizada em  $P_1$  ( $r=2,1309\text{mm}$ ).

A fenda hiperbólica provocou o deslocamento de 3,7% do modo dominante para a direita, isto é,  $F_{110} \approx 6,6862$  GHz, e o surgimento de 3 modos de ressonância: 3 bandas proibidas e 2 bandas passantes. Os resultados estão listados na Tabela I.

TABELA I. DADOS DE PERDA DE INSERÇÃO E DE RETORNO  $|S_{12}|$  E  $|S_{11}|$ : BANDAS DE FREQUÊNCIA COM A FENDA HIPERBÓLICA NO PONTO  $P_1$

Bandas Proibidas (GHz)		
5,2147 - 2,4778	9,3054 - 6,1858	12,3219 - 10,7327
Bandas Passantes (GHz)		
5,2147 - 6,1858		10,7327 - 9,3054

Para o terceiro modelo simulado, a fenda hiperbólica foi posicionada mais próxima das linhas de alimentação de microfita, no ponto  $P_2$ . Na Figura 5 são mostrados os resultados para esse filtro: 2 bandas proibidas e 1 banda passante bem definida para os testes de simulação realizados. Destacamos também, para esse modelo, um sinal transmitido com largura de banda  $L_T = 5,8474 - 5,3913 = 456,01$  MHz. Os resultados estão listados na Tabela II. Trata-se um filtro com boas características, porém o modo dominante com valor  $F_{110} \approx 4,4348$  GHz, revela uma discrepância de aproximadamente 31,21% em relação ao valor teórico  $F_{110}$ , indicando que a modelagem desse terceiro dispositivo permitiu uma redução da frequência do modo fundamental.

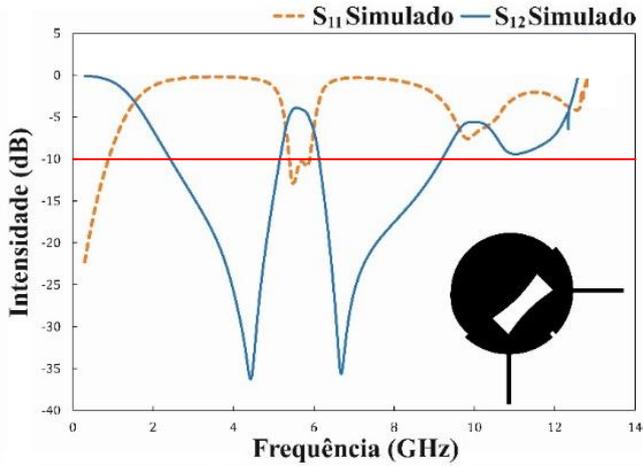


Fig. 5. Gráficos simulados de  $|S_{11}|$  e  $|S_{12}|$  para o filtro circular com uma fenda hiperbólica localizada em  $P_2$  ( $r=2,1309$ mm).

TABELA II. DADOS DE PERDA DE INSERÇÃO E DE RETORNO  $|S_{12}|$  E  $|S_{11}|$ : BANDAS DE FREQUÊNCIA COM A FENDA HIPERBÓLICA NO PONTO  $P_2$

Bandas Proibidas (GHz)	
5,1558 - 2,4336	9,1877 - 6,1417
Bandas Passantes (GHz)	
6,1417 - 5,1558	

O último modelo de filtro circular apresenta duas fendas hiperbólicas, cujos resultados podem ser vistos na Figura 6.

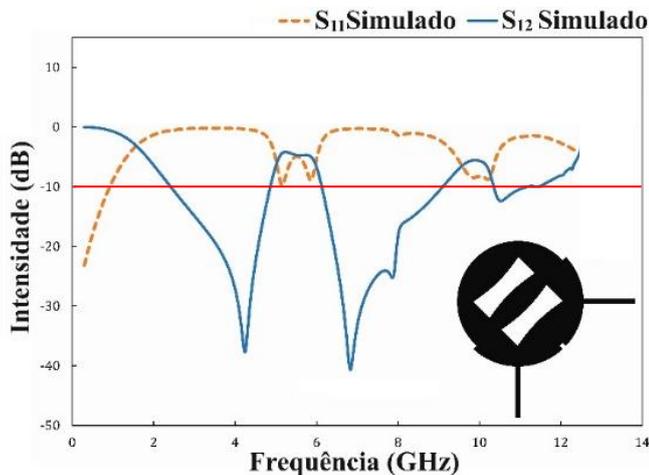


Fig. 6. Gráficos simulados de  $|S_{11}|$  e  $|S_{12}|$  para o filtro circular com duas fendas hiperbólicas localizadas nos pontos simétricos  $P_1$  e  $P_2$ .

Como resultado, temos 3 bandas proibidas e duas bandas passantes bem definidas para a faixa de frequências utilizada para a varredura de testes. Trata-se de um filtro predominantemente rejeita-faixa, cujo modo dominante tem o valor  $F_{110} \approx 6,8333$  GHz, uma diferença de aproximadamente 6% em relação ao valor teórico. Na Tabela III temos um compêndio dos resultados.

TABELA III. DADOS DE PERDA DE INSERÇÃO E DE RETORNO  $|S_{12}|$  E  $|S_{11}|$ : BANDAS DE FREQUÊNCIA COM AS FENDAS HIPERBÓLICAS NOS PONTOS  $P_1$  E  $P_2$

Bandas Proibidas (GHz)		
4,8616 - 2,4042	9,0994 - 6,1270	12,3219 - 10,7327
Bandas Passantes (GHz)		
6,1270 - 4,8616		10,3649 - 9,0994

### III. APLICAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No desenvolvimento do protótipo para a verificação dos resultados, inicialmente foi exportada a figura com o leiaute do filtro com duas fendas hiperbólicas, que apresentou o melhor resultado teórico, mostrado no gráfico da Figura 6 para o formato AUTOCAD (.dxf). Este arquivo permite a confecção de uma máscara adesiva, utilizada para proteger o material condutor da parte superior e inferior (plano de terra) do dispositivo durante a imersão no ácido perclorato de ferro. O processo do corrosão que dura alguns minutos foi realizado no substrato FR4. Por fim, o protótipo foi submetido à medição em um analisador de redes vetoriais, modelo N5230A, e os dados finais obtidos nessa análise podem ser conferidos no gráfico da Figura 8.

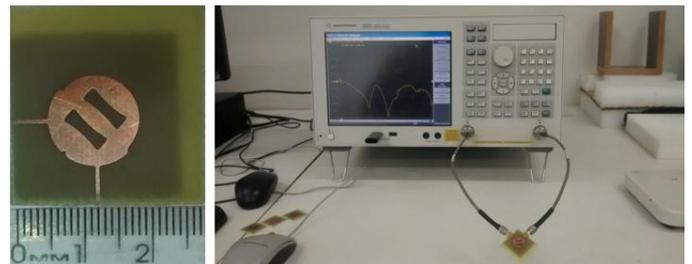


Fig. 7. Filtro com duas fendas hiperbólicas. À esquerda: o protótipo construído. À direita: processo de medição no analisador de redes.

O resultado final apresentou uma boa concordância com os valores obtidos nas simulações. As duas fendas hiperbólicas deram ao filtro circular compacto a característica de multibandas, com a faixa proibida agora alcançando a banda ISM, em torno de 2,4 GHz, reservada para uso não comercial de radiofrequência eletromagnética nas áreas industriais científicas e médica, em nível internacional e sem licenciamento, porém cumprindo os regulamentos que limitam os níveis de potência transmitida e uma faixa proibida localizada na Banda S (IEEE – S Band: 2 – 4 GHz), ver TABELA III. Verificamos também as bandas passantes localizadas nas faixas reservadas para a Banda C (IEEE – C Band: 4 – 8 GHz) e Banda X (IEEE - X Band: 8,0 – 12,0 GHz). Usamos a localização do modo dominante medido em laboratório,  $F_{110} \approx 6,9425$  GHz como referência para determinar o erro experimental aproximado,  $e(\%) \approx 1,6\%$ ,

causado pelas ferramentas de corte do substrato e pelo processo de corrosão.

Como proposta de pesquisas futuras, pretendemos investigar o comportamento desses modelos de filtros de microfita usando métodos mais sofisticados para a construção dos protótipos, tais como, impressão a laser e impressão 3D. Também mudaremos a sua geometria com a adição de novas configurações de defeitos em sua superfície e no plano de terra.

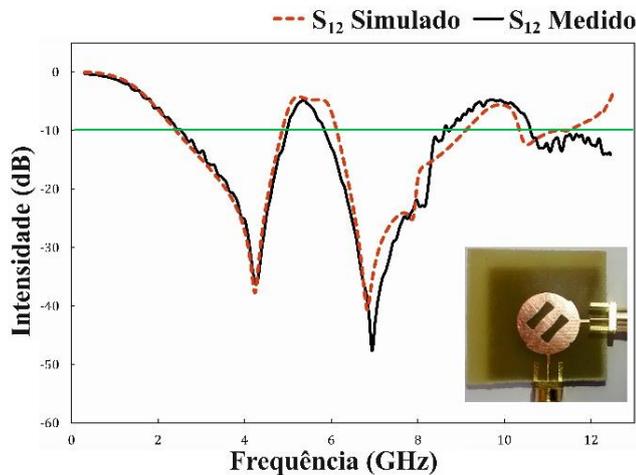


Fig. 8. Gráficos medido e simulados de  $|S_{12}|$  para o filtro circular com duas fendas hiperbólicas.

#### IV. CONCLUSÕES

Neste artigo foi proposta uma configuração de filtro compacto de microfita, com deformações hiperbólicas simétricas no plano superior e plano de terra uniforme, com o objetivo de verificar o aparecimento de multibandas. Após algumas simulações, verificou-se que o modelo com duas hipérbolas apresenta uma gama maior de aplicações. O protótipo construído para o estudo da intensidade do sinal bloqueado e verificação do número de bandas proibidas engloba os 27 canais reservados para a banda ISM, de acordo com os padrões internacionais IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.B. Os resultados, simulado e experimental, foram apresentados e mostraram uma boa concordância entre si. O erro experimental se deve a dificuldades do processo de construção. A comparação entre os dados simulados e medidos permitiu identificar as bandas de passagem e rejeição do filtro.

Do ponto de vista teórico, um filtro circular com duas fendas hiperbólicas possui características de multibandas selecionadas (como é possível verificar na Figura 8), com possíveis aplicações na Banda X (IEEE - X Band: 8,0 – 12,0 GHz), na Banda C (IEEE - C Band: 4 – 8 GHz) e Banda S (IEEE - S Band: 2 – 4 GHz), onde o número de faixas de frequência bloqueadas e a largura da banda proibida também variam com a escolha do posicionamento das fendas. Dentre as diversas aplicações podemos citar comunicações sem fios (por exemplo, WiFi) ou WPAN (*wireless personal area network*, por exemplo, Bluetooth), além de outros aparelhos eletrônicos sem fio como telefones, mouses, teclados e fornos micro-ondas, entre outras.

Os autores do trabalho agradecem ao Grupo de Eletromagnetismo e Matemática Computacional Aplicada – GEMCA; ao Laboratório de Eletromagnetismo e Micro-ondas Aplicadas – LEMA; à Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG e ao Instituto Federal da Paraíba – IFPB, pelo suporte técnico e laboratorial.

#### REFERÊNCIAS

- [1] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and desing*. 2 ed Wiley, 1997.
- [2] B. A. Willians, B. Arthur, F.J. Taylor, *Electronic Filter Design Handbook* (1995). McGraw-Hill. ISBN 0-07-070441-4.
- [3] I. A. Zerev, *Handbook of Filter Synthesis*. John Wiley & Sons (1969). ISBN 0-471-98680-1. *Catalog of passive filter types and component values*. The Bible for practical electronic filter design.
- [4] L. D. Paarmann, *Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective*, Springer, 2001 ISBN 0792373731.
- [5] S. A. L. Caniati, et al. "Analysis of a reconfigurable bandpass circular patch filter." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 58.12 (2010): 3918-3924.
- [6] S. T. Chew and T. Itoh, "PBG-excited split-mode resonator bandpass filter," *IEEE Microwave Wireless Components Lett.*, v. 11, pp. 364–366, Sept. 2001.
- [7] J. Watkins, "Circular resonant structures in microstrip", *Electron. Lett.*, V. 5, pp. 524-525, 1969.
- [8] I. Wolff, N. Knoppik, "Rectangular and circular microstrip disk capacitors and resonators", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, v. 22, No. 10, 857-864, 1974.
- [9] Itoh, T. and R. Mittra, "A new method for calculating the capacitance of a circular disk for microwave integrated circuits", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, v. 22, No. 6, pp. 431-432, 1973.
- [10] B. J. Xiang, S. Y. Zheng, Y. M. Pan, Y. X. Li and Y. L. Long, "Vias and stubs loaded patch and its applications in filter and rectifier designs", *IEEE Open Access Journal*, vol 5, pp.7042 – 7054, 2017.
- [11] Hong, J. S. and M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Application*, Wiley, New York, 2001.
- [12] Ansoft Designer (part of ANSYS Inc.) [Online]. Available: [www.ansoft.com](http://www.ansoft.com).