

FILTRO DE MICROFITA COM DEFORMAÇÕES (STUBS) TRIANGULARES PARA CONTROLE DE PARÂMETROS

Rodrigo César Fonseca da Silva, Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira, Israel Medeiros Pires de Almeida, Pedro Carlos de Assis Júnior, e Marcelo da Silva Vieira

Resumo — Este artigo apresenta um modelo de filtro de microfita com tocos triangulares em sua linha de alimentação para seleção de frequências. Desenvolvemos uma lei experimental que permite alterar os parâmetros de espalhamento, coeficientes de reflexão ($|S_{11}|$) e transmissão ($|S_{12}|$) do filtro através da inclinação dos tocos triangulares, dando-lhe a característica predominante de um filtro rejeita faixa, conforme o padrão de comunicação sem fio IEEE ISM (Industrial, Scientific and Medical) de 2,40 GHz. A excitação foi através da técnica de linha de alimentação de microfita e posteriormente analisado no simulador de onda completa Ansoft Designer™. Resultados simulados e medidos foram comparados.

Palavras-Chave — *Filtro de Microfita, Tocos Triangulares, Bandas de Frequência Rejeitadas.*

Abstract — This paper presents a microstrip filter model with triangular stubs in your power line for frequency selection. We developed an experimental law that allows changing the scattering parameters, reflection coefficient ($|S_{11}|$) and transmission coefficient ($|S_{12}|$), of the filter through the slope of the triangular stubs, giving it the predominant characteristic of a reject band filter and a classification according to the IEEE ISM BAND wireless standard, (Industrial, Scientific and Medical) of 2.4GHz. The excitement was through a microstrip power line technique and later analyzed in the Ansoft Designer™ full wave simulator. Results simulated and measured was compared.

Keywords — *Microstrip Filter, Triangular Stubs, Rejected Frequency Bands.*

I. INTRODUÇÃO

Filtros eletrônicos são dispositivos que selecionam frequências em sinais quaisquer, que são caracterizados por possuírem faixas de passagem e rejeição separadas por regiões de transição. Os sinais localizados dentro de uma determinada faixa de passagem são recebidos com pouca ou nenhuma distorção, já os sinais dentro das faixas de rejeição, são atenuados [1] – [2]. Tais dispositivos passivos tem uma atuação voltada aos aparelhos sem fio, como redes e telefonia celular. Sendo assim, processos de otimização das dimensões e miniaturização vem sendo investigados cada vez mais.

Entre os estudos sobre filtros planares, destacam-se os dispositivos de geração de multibandas passantes, que se utilizam de ressoadores com impedância do tipo degrau (SIR – *Stepped Impedance Resonator*); filtros de microfita que apresentam linhas acopladas paralelas em banda larga [3]; multicamadas de filtros de microfita, que apresentam um conjunto de linhas acopladas [4]; multicamadas de filtros de

microfita com geometria retangular [5]; projetos de filtro de microfita tríplice, com uma carga de acoplamento intensa [6]; filtro de microfita baseado num ressoador indutivo de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda [7]; filtros compactos com geometria retangular, sem deformação no plano terra [8], entre outras aplicações, vem justificando o interesse significativo no desenvolvimento destes dispositivos.

Em linhas gerais, definimos os filtros como um sistema composto de duas portas, dotado de um conjunto de elementos de armazenamento de energia, que podem ser indutores, capacitores e linhas de transmissão. Os dispositivos propostos têm como objetivo o isolamento de determinadas frequências, fazendo com que certos sinais em uma banda de passagem sejam transmitidos, ao mesmo tempo em que recusam ou atenuam sinais não desejados em outra banda. Este comportamento pode ser obtido com diversas associações de capacitores e indutores. Verifica-se que blocos de capacitores DC bloqueiam baixos níveis de frequências ao mesmo tempo que dão passagem para frequências mais altas. Já os indutores apresentam características opostas as 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 [9] – [13]: Filtro Passa Baixa (LPF), onde o sinal passante se encontra abaixo de uma frequência de corte e os demais sinais são rejeitados; Filtro Passa Alta (HPF), onde o sinal passante se encontra acima de uma frequência de corte e os demais sinais são rejeitados; Filtro de Rejeita Banda (BSF), nesse caso ele rejeita ou atenua uma certa banda de frequências limitada pelas frequências de corte inferior e superior, enquanto todas as frequências fora dessa banda são transmitidas; Filtro Passa Banda (BPF), com o comportamento oposto ao BSF, são transmitidos os sinais de uma certa banda de frequência, enquanto todas as outras frequências são rejeitadas. Devido a todas estas especificações, os filtros demandam muito rigor e atenção para o cumprimento dos requisitos de sua implementação: a seletividade de frequência, tamanho, peso, confiabilidade e desempenho em vários ambientes [13].

O filtro proposto neste artigo foi obtido por meio de uma modificação de formato triangular em uma linha de alimentação. A frequência de ressonância central foi criteriosamente proposta para a banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), em torno de 2,40 GHz, permitindo sua classificação segundo os critérios dos padrões internacionais IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.b [14] – [16]. A grande contribuição deste artigo é a determinação de um sistema de

equações experimentais, de acordo com a geometria escolhida para a construção, que permitem a localização da frequência central com uma boa precisão e consequentemente, a largura da banda desejada.

Este artigo está dividido da seguinte forma: na seção II temos o desenvolvimento das equações paramétricas do filtro em função do parâmetro θ (inclinação do toco triangular), que controla a localização da frequência de ressonância inicial; 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 proposto são apresentadas na seção IV, destinada às conclusões do trabalho.

II. DESENVOLVIMENTO

A banda não-comercial de radiofrequência eletromagnética nas áreas industriais, científicas e médica (ISM), opera a nível internacional e sem licenciamento, porém cumprindo os regulamentos que limitam os níveis de potência transmitida. A popularização da banda, que se encontra em torno da frequência central de 2,40 GHz, deve-se a sua aplicação em redes sem fio como WiFi e WPAN (do inglês *Personal Area Network*), além de outros aparelhos eletrônicos sem fio. Neste contexto, o padrão com 16 canais, IEEE 802.15.4 (vide a TABELA I), visa oferecer soluções escaláveis, de baixo consumo e custo no projeto de redes de sensores sem fio.

TABELA I. PADRÃO IEEE 802.15.4: CLASSIFICAÇÃO DAS FAIXAS DE FREQUÊNCIA POR CANAIS DE OPERAÇÃO

Faixas de frequências dos canais relativos ao padrão IEEE 802.15.4			
Canal	Frequência inferior	Frequência central	Frequência superior
01	2,404	2,405	2,406
02	2,409	2,410	2,411
03	2,414	2,415	2,416
04	2,419	2,420	2,421
05	2,424	2,425	2,426
06	2,429	2,430	2,431
07	2,434	2,435	2,436
08	2,439	2,440	2,441
09	2,444	2,445	2,446
10	2,449	2,450	2,451
11	2,454	2,455	2,456
12	2,459	2,460	2,461
13	2,464	2,465	2,466
14	2,469	2,470	2,471
15	2,474	2,475	2,476
16	2,479	2,480	2,481

Ainda dentro da faixa de 2,40 GHz, temos o padrão IEEE 802.11.b que oferece tecnologia que engloba redes locais sem fio com altas taxas de disponibilidade e transferência. Trata-se de um padrão que define a camada física e a camada de acesso ao meio físico de comunicação. Também é dividido em canais de frequência, sendo definidos 11 canais destinados à utilização desse padrão no Brasil e EUA, cujos valores podem ser conferidos na Tabela II.

Este trabalho foi motivado por estudos de design de filtros eletrônicos, pela modificação da linha de alimentação com a inserção de deformações de formatos diversos (vide [17] e suas referências). Apresentamos uma alternativa de verificação da variação do comportamento em frequência de filtros eletrônicos por meio de um modelo experimental, que

utiliza apenas os aspectos geométricos do dispositivo, simulações e cálculo numérico. Os parâmetros de simulação foram estabelecidos para que a alimentação do filtro com tocos triangulares fosse realizada por linhas de microfita de $W_0 = 2,83$ mm de largura e comprimento 50 mm. Um cabo coaxial de 50 Ω conecta-se à linha de alimentação do elemento patch através de um conector SMA. Como substrato dielétrico, foi utilizado o FR4 (fibra de vidro) de espessura igual a 1,5 mm, permissividade elétrica (ϵ_r) de 4,4.

TABELA II. PADRÃO IEEE 802.11.B: CLASSIFICAÇÃO DAS FAIXAS DE FREQUÊNCIA POR CANAIS DE OPERAÇÃO

Faixa de frequências dos canais relativos ao padrão IEEE 802.11.b			
Canal	Frequência inferior	Frequência central	Frequência superior
01	2,401	2,412	2,423
02	2,404	2,417	2,428
03	2,411	2,422	2,433
04	2,416	2,427	2,438
05	2,421	2,432	2,443
06	2,426	2,437	2,448
07	2,431	2,442	2,453
08	2,436	2,447	2,458
09	2,441	2,452	2,463
10	2,451	2,457	2,468
11	2,451	2,462	2,473

Após uma série de simulações no software Ansoft Designer™ [18], com a mudança do ângulo (θ), que corresponde à inclinação da deformação triangular (stub) inserida na linha de alimentação do modelo apresentado na Figura 2, nota-se que a banda ISM pode ser verificada experimentalmente quando os tocos triangulares apresentam inclinação dentro do intervalo fechado $64^\circ \leq \theta \leq 68^\circ$, entre os 12 melhores resultados simulados selecionados para compor a TABELA III.

TABELA III. DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES SUCESSIVAS USANDO O PARÂMETRO PADRÃO θ COMO REFERÊNCIA

Frequência Central (GHz)	Área Total (mm ²)	Ângulo θ (°)
2,55	600	62,00
2,49	600	64,00
2,47	600	65,00
2,42	600	66,00
2,37	600	68,00
2,34	600	69,00
2,30	600	70,00
2,23	600	72,00
2,14	600	74,00
2,09	600	75,00
2,05	600	76,00
1,96	600	77,00

De posse deste conjunto de pontos simulados, fizemos uso da Fórmula de Interpolação de Thiele [19]:

$$F(x) = F(x_1) + \frac{x - x_1}{\rho_1 + \frac{x - x_2}{\rho_2 - F(x_1) + \frac{x - x_3}{\rho_3 - \rho_1 + (\dots)}}} \quad (1)$$

onde $\rho_n = \rho_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$ representa uma diferença recíproca, que tem a forma geral:

$$\rho_n = \frac{x - x_n}{\rho_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) - \rho_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_n) + \rho_{n-2}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1});} \quad (2)$$

para estabelecer uma relação numérico-experimental entre o ângulo θ do filtro e a frequência de ressonância. Assim, com os dados da Tabela III, em termos da inclinação da deformação na linha de alimentação e suas respectivas frequências centrais, após uma longa e extenuante série de cálculos, encontramos

$$F(\theta) \cong - \frac{0,01665181597 f(\theta)}{f_6(\theta) f_7(\theta) f_8(\theta) f_9(\theta)} \quad (3)$$

onde temos $f(\theta) = f_1(\theta) f_2(\theta) f_3(\theta) f_4(\theta) f_5(\theta)$, e

$$f_1(\theta) = \theta^2 - 131,6379445\theta + 4332,330215; \quad (3.a)$$

$$f_2(\theta) = \theta - 231,1146936; \quad (3.b)$$

$$f_3(\theta) = \theta - 84,93914366; \quad (3.c)$$

$$f_4(\theta) = \theta - 76,08276364; \quad (3.d)$$

$$f_5(\theta) = \theta - 68,81230914; \quad (3.e)$$

$$f_6(\theta) = \theta^2 - 131,6274227\theta + 4331,651918; \quad (3.f)$$

$$f_7(\theta) = \theta - 87,35353018; \quad (3.g)$$

$$f_8(\theta) = \theta - 76,080651918; \quad (3.h)$$

$$f_9(\theta) = \theta - 68,82073636. \quad (3.i)$$

A Figura 1 mostra o gráfico do comportamento da frequência de acordo com a inclinação do toco triangular, de acordo com a Equação (3).

Na seção seguinte detalharemos o uso desta lei experimental para as frequências.

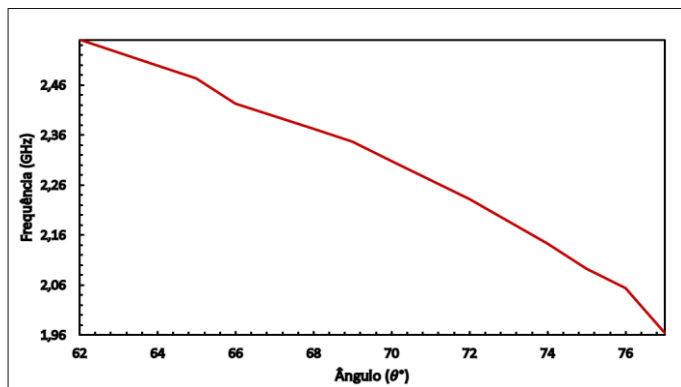


Fig. 1. Gráfico da Frequência de ressonância (cálculo feito sem a linha de alimentação) variando com o ângulo θ : A linha sólida representa a lei experimental obtida pela interpolação dos pontos da Tabela III.

III. APLICAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Como aplicação, iremos propor um filtro que opere dentro da banda ISM, substituindo o valor $F(\theta) = 2,45$ GHz na equação (3) que, por sua vez, retorna o resultado $\theta = 64,95841483^\circ$ para inclinação do defeito triangular que será inserido na linha de alimentação. No desenvolvimento da simulação deste filtro utilizamos uma placa retangular 550 mm^2 , na qual inserimos o defeito triangular, com dimensões: a

= 11 mm e b = 25 mm. O comprimento da linha de microfita é $2b$ e a largura é W_0 , como pode ser visto na Figura 2.

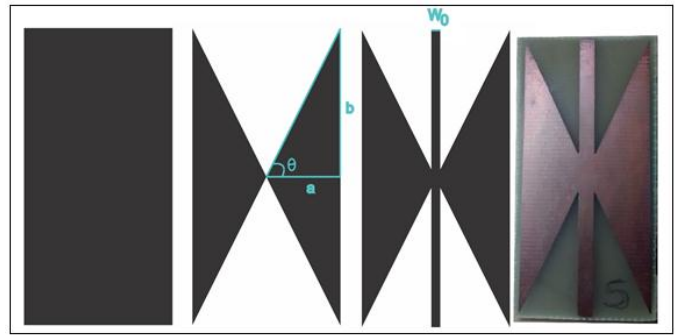


Fig. 2. Máscara adesiva do filtro proposto e protótipo construído.

O resultado obtido para esta simulação foi um filtro que opera na frequência central predominante de $f_r = 2,4739$ GHz, que corresponde a um erro de aproximadamente 0,9755102% em relação à frequência central pretendida para este primeiro teste. A largura de banda, onde se localiza a frequência central dominante, é de 0,9535 GHz (2,1179 – 3,0714 GHz), englobando os 27 canais de operação oferecidos pelos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.b, como pode ser visto na Figura 3 e TABELA IV. É importante frisar que este excelente resultado só foi possível graças ao uso dos valores exatos das dimensões obtidas com o uso da equação (3) e de softwares de matemática computacional que permitem a importação dos gráficos diretamente para o Ansoft Designer™. Utilizamos a técnica de corrosão do substrato de FR4, com ácido perclorato de ferro, para a construção do protótipo submetido à medição em um analisador de redes vetoriais, modelo N5230A. O processo consiste na exportação da figura com a estrutura do filtro para o formato AUTOCAD (.dxf), que nos permite a confecção de uma máscara adesiva que protege o material condutor da parte superior e inferior (plano de terra) do filtro durante a imersão no ácido, que dura alguns minutos.

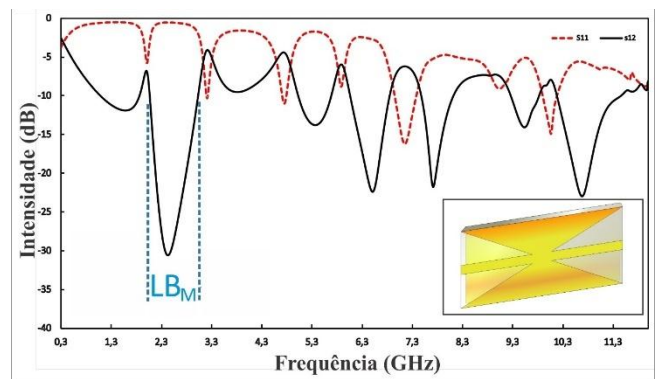


Fig. 3. Filtro com Tocos Triangulares Simulado para operar na banda ISM, com ângulo $\theta \sim 64,9^\circ$. Parâmetros de Simulação: $A_T = 600 \text{ mm}^2$; a = 11 mm; b = 25mm; (escolhidos para o teste).

TABELA IV. COMPORTAMENTO MULTIBANDA DO FILTRO COM TOCOS TRIANGULARES SIMULADO, REPRESENTADO NA FIGURA 3.

Bandas Rejeitadas (GHz)			
1,940 – 1,075	3,097 – 2,105	5,665 – 5,156	6,796 – 6,211
8,245 – 7,406	9,974 – 9,173	11,33 – 10,16	12,75 – 11,97
Bandas de Transmissão (GHz)			
4,889 – 4,788	5,995 – 5,932	7,610 – 6,898	10,35 – 10,02

Este processo químico e o corte da placa usando uma guilhotina provocam pequenas imperfeições no filtro que não permitem a precisão do uso de todas as casas decimais na aplicação deste trabalho. Estas imperfeições provocam algumas mudanças nas medidas, em relação aos valores simulados. Na Figura 2 temos a imagem do protótipo desenvolvido de acordo com as especificações extraídas do modelo teórico.

O comportamento dos coeficientes de transmissão $|S_{12}|$, simulado e experimental, para esse filtro é apresentado no gráfico da Figura 4, onde podemos constatar uma boa concordância entre os resultados simulado e medido com uma diferença de aproximadamente 0,01% entre eles, mas ainda assim, engloba os 27 canais oferecidos pelos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11.b.

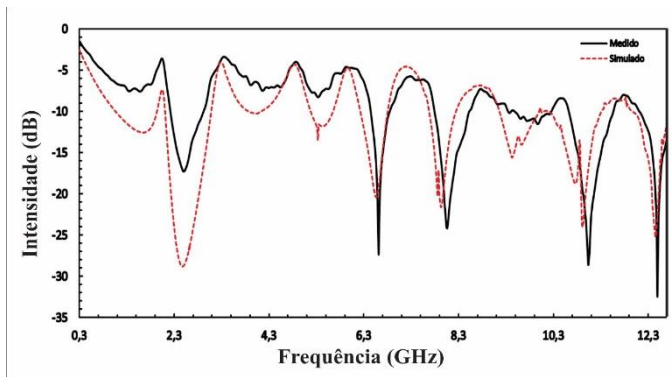


Fig. 4. Coeficiente de transmissão para o filtro triangular com $\theta = 64,9^\circ$. Resultados Experimentais: $f_r = 2,47$ GHz (Frequência Central) e $LB_M = 0,9535$ GHz (Largura de Banda: 2,1179 – 3,0714 GHz).

Atribuímos a diferença na amplitude das medidas à escolha do processo de construção, dificuldades no controle da reação química de corrosão da placa e pequenas imperfeições na placa de FR4, além de uma condição não ideal para o SETUP de medição.

IV. CONCLUSÃO

Neste artigo foi proposto um filtro de microfita, com deformações triangulares na linha de alimentação, que opera com eficácia na banda ISM. Após uma série de simulações e uma análise do desempenho, verificou-se que a partir desse modelo é possível obter uma lei experimental para a determinação da frequência central da banda ISM bastante eficiente e viável. Elaboramos 12 modelos com ângulos variados, para a partir dos respectivos resultados de tais filtros, elaborar a equação (3), a partir dela construímos um filtro de teste simulado para localização da frequência 2,45 GHz e para o estudo da intensidade do sinal bloqueado e verificação do número de bandas proibidas.

Os resultados simulado e experimental, foram apresentados e mostraram uma boa concordância entre si, validando assim o projeto proposto. O erro experimental se deve a dificuldades do processo de construção. A comparação entre os dados simulados e medidos permitiu identificar as regiões de passa banda e rejeita banda do filtro projetado.

Para valores acima de 4,0 GHz um filtro triangular possui características de multibandas selecionadas, com possíveis aplicações na Banda C (IEEE - C Band: 4,0 – 8,0 GHz) e na Banda X (IEEE - X Band: 8 – 12 GHz), onde o número de faixas de frequência bloqueadas e a largura da banda proibida também variam com a escolha do ângulo interno dos triângulos. Para trabalhos futuros, pretendemos investigar o

comportamento de outros 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 no plano de terra.

AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho agradecem ao Grupo de Eletromagnetismo e Matemática Computacional Aplicada – GEMCA, à Universidade Estadual da Paraíba – UEPB e ao Instituto Federal da Paraíba - IFPB pelo suporte técnico e laboratorial.

REFERÊNCIAS

- [1] J.S. Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave applications*. 2001 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: 0-471-38877-7.
- [2] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and desing*. 2 ed Wiley, 1997.
- [3] W. N. Chen, M. H. Weng, T. H., Huang, T. C. Cheng and B. T. Dai; "Microstrip Coupled-Line Bandpass Filter With a Multilayer". *Microwares and Optical Technology Letters*, v. 39, 2003.
- [4] S. Sathamsakul, N. Anantrasirichai, C. Benjangkprasert and T. Wakabayashi, "Rectangular Patch Antenna with inset feed and modified ground-plane for wideband antenna", *SICE Annual Conference 2008*, pp. 3400-3403, 2008.
- [5] Z. Zakaria, W. Y. Sam, M. Z. A. Abd Aziz, A. Awang Md Isa, and F. Mohd Johar, "Design of Integrated Rectangular SIW Filter and Microstrip Patch Antenna", *2012 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE 2012)*, December 11 - 13, 2012, Melaka, Malaysia
- [6] C. C. Chen, J. T. Kuo, M. Jiang, and A. Chin, "Study of Parallel Coupled-Line Microstrip Filter in Broadband". *Microwares and Optical Technology Letters*, v. 48, 2006.
- [7] C. L. Wei, B. F. Jai, and Z. J. Zhu, "Desing of Triple-Mode Microstrip Filter with Source-Load Coupling", *Microwares and Optical Technology Letters*, v. 53, 2011.
- [8] Rajendra Dhakal, Nam-Young Kim, "A Compact Symmetric Microstrip Filter Based on a Rectangular Meandered-Line Stepped Impedance Resonator with a Triple-Band Bandstop Response", *The Scientific World Journal*, 2013.
- [9] Matthaei, Young, Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, McGraw-Hill 1964.
- [10] I. A. Zverev (1969). *Handbook of Filter Synthesis*. John Wiley & Sons. ISBN 0-471-98680-1. Catalog of passive filter types and component values. The Bible for practical electronic filter design.
- [11] B. A. Williams, Arthur B; Taylor, Fred J (1995). *Electronic Filter Design Handbook*. McGraw-Hill. ISBN 0-07-070441-4.
- [12] B. A. Sheno, *Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design*, John Wiley & Sons, 2005 ISBN 0471656380.
- [13] L. D. Paarmann, *Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective*, Springer, 2001 ISBN 0792373731.
- [14] M. Biggs, A. Henley and T. Clarkson. "Occupancy Analysis of the 2.4GHz ISM Band". *IEEE Proceedings Communications*, v. 151, 2004.
- [15] IEEE Std 802.11™-2007. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*.
- [16] IEEE Std 802.15.4™-2006. *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*.
- [17] P. K. Singh, A. K. Tiwary, "Novel Compact Dual Bandstop Filter Using Radial Stub", *Microwave Review Journal*, 2015.
- [18] Ansoft Designer (part of ANSYS Inc.) [Online]. Available: www.ansoft.com.
- [19] M. Abramowitz and I. A. Stegun (Eds.). *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, 9th printing. New York: Dover, p. 881, 1972.