

Um filtro passa-baixa compacto de microfita com ampla banda de rejeição e *roll-off* acentuado

Gleudson José Ataíde de Carvalho (IFPB, Campus João Pessoa), Marcus Vinicius Rocha Cohen (IFPB, Campus João Pessoa), Dhiego José Batista de Andrade (IFPB, Campus João Pessoa), Bianca da Silva Ferreira (IFPB, Campus João Pessoa), Alfredo Gomes Neto (IFPB, Campus João Pessoa).

E-mails: gleudson.jose@academico.ifpb.edu.br, marcus.rocha@academico.ifpb.edu.br, dhiegoibandrade@gmail.com, biancasfengcivil@gmail.com, alfredogomes@ifpb.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.06.01-3 Teoria Eletromagnética, Microondas, Propagação de Ondas, Antenas.

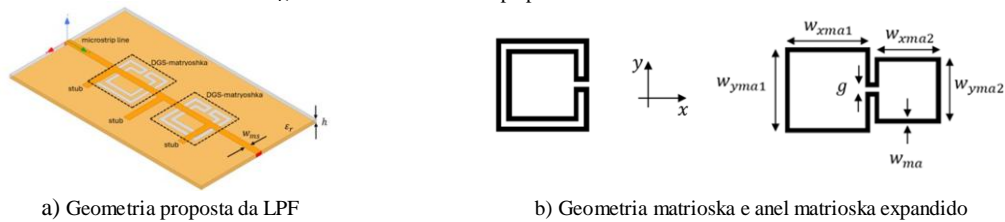
Palavras-chave: filtro; banda larga de rejeição; matrioska; miniaturização.

1. Introdução

O crescimento do trabalho remoto e do ensino à distância, o uso contínuo de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT) e a inteligência artificial (IA), a telemedicina e a agricultura 4.0 são alguns exemplos do impacto das telecomunicações [1]. Os filtros são essenciais nos sistemas de telecomunicações, sendo responsáveis por separar os sinais desejáveis dos indesejáveis, de modo a evitar interferência e aumentar a eficiência de radiação da antena [2]. Apesar dos avanços no projeto de filtros passa-baixas (LPFs), novas configurações têm sido investigadas para atender aos requisitos, como peso e volume reduzidos, baixo custo, miniaturização, bem como baixa perda de inserção (IL), *roll-off* (ROR) acentuado e ampla banda de rejeição [3]-[5].

Neste trabalho, é apresentado um LPF compacto com ampla banda de rejeição e *roll-off* acentuado. O LPF proposto combina células de duas unidades DGS-matrioska e três tocos, Fig. 1(a). Inicialmente, a resposta de frequência de cada geometria é analisada e, posteriormente, o conjunto é otimizado. Os resultados numéricos e medidos são apresentados, verificando uma boa concordância. Observa-se que a principal contribuição deste artigo é a geometria proposta, para a qual o processo de otimização ainda está em desenvolvimento, com potencial de melhorias adicionais.

Figura 1 – Geometrias: LPF proposto e matrioska.



a) Geometria proposta da LPF

b) Geometria matrioska e anel matrioska expandido

Fonte: Autor.

2. Materiais e métodos

Uma revisão sobre a geometria matrioska foi publicada em [7]. Quando usada como DGS, dependendo da posição do gap em relação à microfita, diferentes respostas em frequência podem ser obtidas. Neste trabalho são considerados dois anéis concêntricos quadrados, Fig. 1(b). Como uma aproximação inicial, a primeira frequência ressonante pode ser estimada por (1), [7].

$$f_{AD} = \frac{3 \times 10^8}{L_{efe} \sqrt{\epsilon_{reff}}}, \quad (1)$$

$$L_{efe} = 3 \times (w_{ma1} + w_{ma2}) + 2 \times (w_{ma1} - w_{ma2}), \quad (2)$$

ϵ_{reff} é a constante dielétrica efetiva de uma microfita com largura w_{ma1} , espessura do substrato h e constante dielétrica ϵ_r . Esse valor pode ser calculado utilizando um dos softwares disponíveis, como, por exemplo, [8].

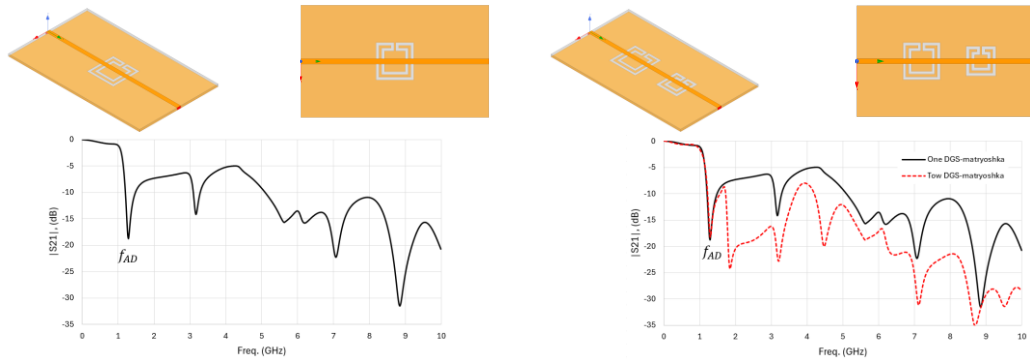
Os tocos são estruturas bem conhecidas que são usadas para melhorar o desempenho de muitos circuitos de microfita [11]. Sua primeira frequência ressonante pode ser estimada pela equação (4), [2].

$$f_{AS} = \frac{3 \times 10^8}{4l_{efs} \sqrt{\epsilon_{reff}}}, \quad (3)$$

onde l_{efs} é o comprimento efetivo do toco.

Na Fig. 2(a) é apresentada a resposta em frequência típica para uma célula DGS-matrioska. Usando duas células unitárias DGS-matrioska, Fig. 2(b), a resposta de frequência pode ser otimizada para minimizar as bandas de frequência indesejáveis. Isso pode ser feito ajustando-se a distância entre as DGS-matrioska e suas dimensões. Embora a resposta de frequência esteja mais próxima de um LPF com uma ampla banda de rejeição, ainda há bandas de frequência indesejadas. Contudo, observa-se que a primeira frequência ressonante e o *roll-off* acentuado permanecem praticamente inalterados.

Figura 2 – Resposta em frequência para DGS-matrioska com uma e duas células unitárias.



a) Uma unidade de DGS-matrioska e resposta em frequência b) Duas unidades de DGS-matrioska e resposta em frequência
Fonte: Autor.

Para ajustar a resposta em frequência, a combinação da DGS-matrioska os três tocos pode ser utilizada. De acordo com essas características, a seguir é apresentado um guia passo a passo para projetar o LFP com ampla banda de rejeição.

- 1-Dados de entrada: características do substrato (ϵ_r , h) e primeira frequência de ressonância desejada, f_{AD} .
- 2-Usando (1), projete o maior DGS-matrioska, “A” na Fig. 3, verificando numericamente se o resultado obtido corresponde ao esperado.
- 3-Insira a segunda DGS-matrioska, “B” na Fig. 4, e otimize suas dimensões e a distância do primeiro DGS-matrioska. Uma primeira tentativa é:

$$0,8 \leq \frac{w_{ma2}}{w_{ma1}} \leq 1,0 \quad (4)$$

$$0,3 \leq \frac{d_{AB}}{w_{ma1}} \leq 0,8 \quad (5)$$

- 4-Para $f_{AS} = 1,5f_{AD}$, usando (3), determine o comprimento inicial do stub 2, l_{st2} , Fig. 3. Como uma primeira aproximação, considere $l_{st2} = l_{efs}$. Observe que está sendo considerado que a largura do stub é igual a largura da microfita, $w_{st} = w_{ms}$.

- 5- Usando (6), determine o comprimento dos stubs 1 e 3. Os stubs 1 e 3 são colocados, praticamente, sobre os braços laterais da DGS-matrioska, onde acontece uma forte interação dos campos eletromagnéticos, de acordo com (7) e (8).

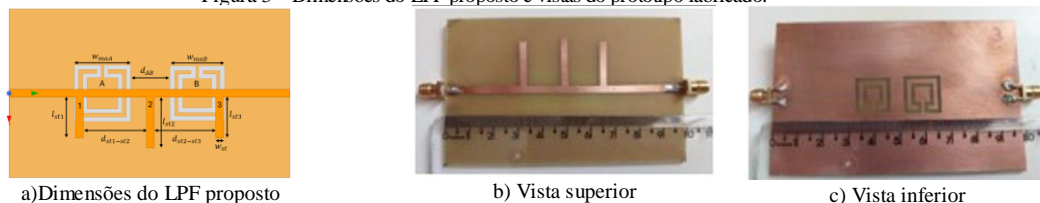
$$l_{st1} = l_{st3} = 0,8l_{st2} \quad (6)$$

$$d_{st1-st2} = \frac{(d_{AB} - w_{st})}{2} + w_{ma1} - w_{st} \quad (7)$$

$$d_{st2-st3} = \frac{(d_{AB} - w_{st})}{2} + w_{ma2} - w_{st} \quad (8)$$

Deve-se observar que os valores calculados nas etapas 1 a 5 são estimativas iniciais que devem ser otimizadas numericamente, de acordo com as restrições de resposta de frequência desejadas. Para verificar as características esperadas do LFP, um protótipo foi projetado e caracterizado. Os resultados são apresentados no próximo tópico.

Figura 3 – Dimensões do LPF proposto e vistas do protótipo fabricado.



a)Dimensões do LPF proposto

b) Vista superior

c) Vista inferior

Fonte: Autor.

3. Resultados e discussão

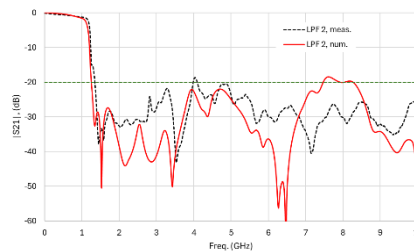
O protótipo do LPF foi projetado, fabricado e caracterizado, usando um substrato de fibra de vidro FR-4 de baixo custo ($\epsilon_r = 4,4$, tangente de perda 0,02), com dimensões totais de $60 \times 100 \times 1,6 \text{ mm}$. A Tabela 1 apresenta as dimensões do LPF. A frequência da primeira ressonância é $f_{AD} = 1,35 \text{ GHz}$. A Figs. 3(a) e 3(b) apresentam o protótipo fabricado. Os resultados numéricos foram obtidos usando o software ANSYS HFSS, e os resultados medidos foram adquiridos no laboratório de medições de micro-ondas do GTEMA/IFPB, usando um analisador de rede de duas portas Agilent E5071C.

Tabela 1 – Dimensões do LFP (em mm)

w_{ma1A}	w_{ma2A}	g_A	w_{mas1A}	w_{mas2A}	w_{ma1B}	w_{ma2B}	g_B	w_{mas1B}
15,0	9,0	1,0	1,5	1,5	14,0	8,0	1,0	1,5
w_{mas2B}	d_{AB}	$l_{st1,3}$	l_{st2}	$d_{st1-st2}$	$d_{st2-st3}$	w_{st}	w_{ms}	
1,5	5,4	18,4	20,0	14,5	13,5	2,8	2,8	

A resposta de frequência simulada é mostrada na Fig. 4. Observa-se que após atingir -20 dB, o valor de $|S_{21}|$ permanece abaixo desse limite até 7,5 GHz. Usando (1), a frequência de ressonância obtida (f_{AD}) foi de 1,43 GHz, uma boa aproximação, indicando a validade das equações de projeto. Para a frequência de corte e o nível de -20 dB, a taxa de *roll-off* (ROR) é de 56,7 dB/GHz. Para a frequência f_{AD} (1,35 GHz), considerando o comprimento de onda do espaço livre (λ_0), o tamanho do circuito normalizado (NCS) é $0,24\lambda_0 \times 0,13\lambda_0$. As respostas em frequência numérica e medida apresentam uma boa concordância.

Figura 4 - $|S_{21}|$, (dB) × Freq. (GHz) – resultados numéricos e experimentais.



Fonte: Autor.

4. Considerações finais

Neste trabalho, foi apresentado um novo projeto para um filtro passa-baixa compacto, com larga banda de rejeição e *roll-off* acentuado. O LFP proposto combina duas DGS-matroska e três tocos, onde o processo de análise foi realizado individualmente para entender suas respectivas funções e contribuições para a resposta geral do filtro. O procedimento de projeto passo a passo foi sugerido, incluindo as equações iniciais de projeto. Para verificar as características esperadas, um protótipo com uma frequência de ressonância de 1,35 GHz foi fabricado e caracterizado, verificando-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e os medidos. Obteve-se um *roll-off* de 56,7 dB/GHz, e um tamanho de circuito normalizado de $0,24\lambda_0 \times 0,13\lambda_0$. Apesar dos resultados iniciais serem interessantes, é importante destacar que a principal contribuição deste trabalho é a geometria proposta, para a qual o processo de otimização ainda está em desenvolvimento, indicando fortes expectativas de melhorias.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)-Brasil, em parte pelo Instituto Federal da Paraíba (IFPB) e pelo Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE-IFPB.

Referências

- [1] A. El Hajj, "The Impact of Telecommunications on Our Society," *Insidetelecom – International Telecoms Business Magazine*, 28 June, 2022. [Online]. Available: <https://insidetelecom.com/the-impact-of-telecommunications-on-our-society/>, (accessed May. 07, 2025).
- [2] Jia-Shen G. Hong, Michael J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/microwave applications*, John Wiley & Sons, 2004.
- [3] Eman G. Ouf, Anwer S. Abd El-Hameed, Esmat A.F. Abdallah, "Compact lowpass filter with vast out-of-band rejection utilizing DGS," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 177, 2024, 155207, ISSN 1434-8411, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2024.155207>.
- [4] S. Soltani, H. Pakniat, N. Yasrebi, "A wide stopband, high selectivity microstrip low-pass filter for wireless communications," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 185, 2024, 155443, ISSN 1434-8411, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2024.155443>.
- [5] M. Hayati, S. Lotfi, H. Siahkamari, T. Blecha, R. Linhart, and M. (Behdad) Jamshidi, "A compact simple microstrip lowpass filter based on elliptical analyzed resonator", *Frequenz*, vol. 76, no. 5-6, 2022, pp. 247-254. <https://doi.org/10.1515/freq-2021-0157>.
- [6] A. Gomes Neto, A. G. DAssunção, J. C. e. Silva, A. N. da Silva, H. d. P. A. Ferreira and I. S. S. Lima, "A proposed geometry for multi-resonant frequency selective surfaces," *2014 44th European Microwave Conference, Rome, 2014*, pp. 897-900. doi: 10.1109/EuMC.2014.6986580.
- [7] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, J. N. de Carvalho, and C. Peixeiro, "Planar Printed Structures Based on Matryoshka Geometries: A Review," *Micromachines*, vol. 15, no. 4: 469, 2024. <https://doi.org/10.3390/mi15040469>.
- [8] <https://www.microwaves101.com/calculators/864-coplanar-waveguide-calculator>. Accessed: May 25, 2025.
- [9] T. C. Edwards, M. B. Steer, *Foundations of Interconnect and Microstrip Design*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England, 2000.