

# Melhoria da Atenuação Livre de Filtro Rejeita-faixa Compacto Matrioska a Partir da Aplicação de Ressonadores de Anéis Fendidos Complementares

João Alexandre da Silva Neto, Antonio Luiz P. S. Campos, Alfredo Gomes Neto e Ianes B. Grécia Coutinho

**Resumo**— Este artigo propõe a melhoria de parâmetros de um filtro rejeita-faixa compacto baseado na geometria Matrioska. A melhoria dos parâmetros é conseguida a partir da modificação do plano de terra dos filtros analisados, pela inserção de ressonadores de anéis fendidos complementares (CSRR – *Complementary Split-ring Resonators*). São analisados filtros com CSRR circulares e retangulares. A inserção de CSRR circulares melhorou a atenuação livre, enquanto que a inserção de CSRR retangulares levou a uma melhoria da seletividade do filtro. São apresentados resultados numéricos e experimentais, observando-se uma boa concordância entre os mesmos.

**Palavras-Chave**— *filtro rejeita-faixa, geometria Matrioska, ressonadores de anéis fendidos complementares, CSRR.*

**Abstract**— This paper proposes the improvement of parameters of a reject-band compact filter based on the Matrioska geometry. The improvement of the parameters is achieved by modifying the ground plane of the analyzed filters by the insertion of Complementary Split-ring Resonators (CSRRs). Filters with circular and rectangular CSRRs are analyzed. The insertion of circular CSRRs improved the free attenuation, whereas the insertion of rectangular CSRR led to an improvement of the selectivity of the filter. Numerical and experimental results are presented, observing a good agreement between them.

**Keywords**— *Stopband filter, Matrioska geometry, Complementary split ring resonator, CSRR.*

## I. INTRODUÇÃO

Recentemente, tem-se observado que a utilização dos sistemas de telecomunicação cresceu rapidamente, devido ao aumento na quantidade de aplicações que usam tecnologias de comunicação sem fio. Com isso, surge a necessidade de atender à crescente e contínua demanda por bens e serviços que utilizam dispositivos que operem em diferentes faixas de frequência sem que haja interferência ou impedimento entre os serviços oferecidos [1].

Neste contexto, as limitações do espectro de frequência tornam necessária a otimização da utilização das faixas de frequências disponíveis, destacando-se entre essas, a faixa ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), de 2 a 3 GHz, aproximadamente, e a faixa UNII (*Unlicensed National Information Infrastructure*) de 5 a 6 GHz, aproximadamente. Considerando o intenso uso dessas faixas de frequência, em algumas aplicações esses sinais podem se apresentar como uma interferência [2].

Assim, essa crescente demanda de aplicações das comunicações sem fio em altas frequências, faz com que os

engenheiros de telecomunicações tenham que desenvolver filtros que atendam a requisitos específicos de resposta em frequência. Neste caso, a utilização da tecnologia planar em microfita tem sido uma opção bastante utilizada [3]–[6].

Os filtros planares possuem um fator de flexibilidade para obtenção de determinadas respostas em frequência, sua geometria. Dentre os filtros planares, podem ser destacados os filtros baseados em ressonadores, que são amplamente empregados em sistemas de comunicações sem fio, pois, apesar de apresentarem desvantagens quando comparados a outros tipos de filtros, são adotados pela facilidade de fabricação, diversidade de aplicações, além da possibilidade de integração direta, com circuitos ativos [2].

Em [2], os autores propuseram o uso da geometria Matrioska que, diferentemente dos ressonadores com anéis concêntricos, os anéis internos permanecem interligados, formando um único anel, obtendo-se um maior comprimento efetivo e, conseqüentemente, interessantes características de miniaturização. Entretanto, com apenas um estágio, o filtro proposto apresentou baixo desempenho em alguns parâmetros, como atenuação livre.

Visando manter uma menor área ocupada pelo filtro, garantindo a miniaturização, nesse trabalho é proposto a inserção de ressonadores de anéis fendidos complementares, no plano de terra do filtro, para melhoria de alguns parâmetros, que se mostraram deficitários em [2]. Assim, é proposto o estudo do efeito sobre a resposta em frequência de um filtro rejeita-faixa Matrioska, com um estágio, devido à inserção de CSRR circulares e retangulares, no plano de terra desse filtro.

## II. GEOMETRIA MATRIOSKA

O grupo de Telecomunicação e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA), do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), tem desenvolvido diversos estudos, que utilizam a geometria Matrioska, em superfícies seletivas em frequência [7]–[10], filtros [1], [2], [11] e sensores [12].

Neste trabalho, serão considerados filtros para aplicações na faixa de 2,4 GHz, assim, foram considerados apenas dois anéis Matrioska. Todas as dimensões físicas estão ilustradas em Fig. 1, em que  $w_0$  é a largura da fita de alimentação do filtro,  $w$  é a largura da fita dos anéis Matrioska,  $g$  é a fenda dos anéis interno e externo,  $L_{1ext}$  e  $L_{2ext}$  são as larguras externas dos anéis interno e externo, respectivamente.

A resposta em frequência obtida para um filtro com dois anéis Matrioska é semelhante à obtida para filtros com anéis C

João Alexandre da Silva Neto e Antonio L. P. S. Campos, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, e-mail: alpscamos@gmail.com; Alfredo Gomes Neto e Ianes B. G. Coutinho, Instituto Federal da Paraíba, e-mail: alfredogomesjpa@gmail.com.

assimétricos [2] e é ilustrada em Fig. 2, sendo definidos os parâmetros: Frequências de corte em 3 dB ( $fc1$  e  $fc2$ ), frequências de ressonância ( $fr1$  e  $fr2$ ), largura da banda de rejeição definida em 3 dB (BRW), atenuação livre (AL), e região de transição de 3 dB a 30 dB.

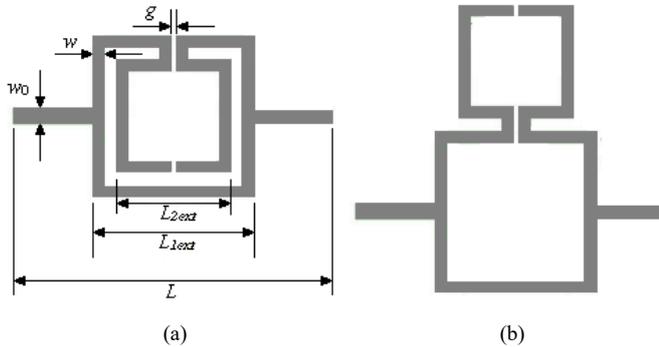


Fig. 1. Geometria Matrioska: (a) com dois anéis e (b) expandida.

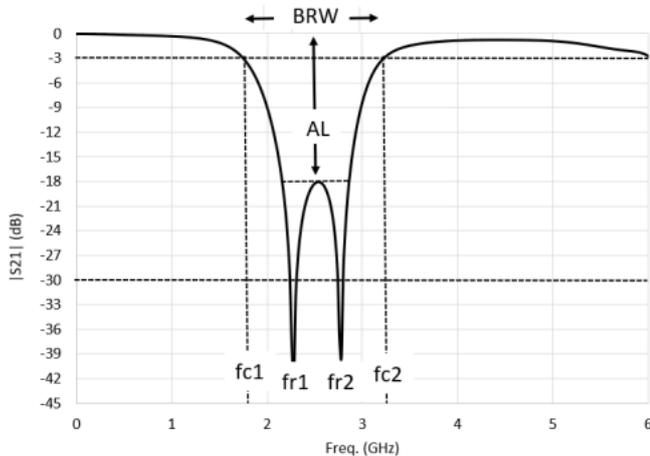


Fig. 2. Resposta em frequência típica de um ressonador com dois anéis Matrioska.

Para se conseguir uma determinada resposta em frequência, considerando uma mesma área ocupada pelo anel mais externo, é possível variar parâmetros tais como as dimensões dos anéis internos, o espaçamento entre os anéis, o número de anéis, entre outros. As equações de projeto foram apresentadas em [2].

### III. RESSONADORES DE ANÉIS FENDIDOS COMPLEMENTARES

Ressonadores de anéis fendidos complementares (CSRR – *Complementary Split-ring Resonator*) foram inicialmente propostos por Falcone *et al.* em [13]. Os CSRR podem ser usados para projetar tanto estruturas rejeita-faixa quanto estruturas passa-faixa [14] – [16].

Quando adequadamente polarizado, o CSRR cria regiões de rejeição em frequência, originadas pela criação de uma região de valores negativos de permissividade  $\epsilon$  nas vizinhanças da frequência de ressonância do CSRR. Assim, estes ressonadores podem melhorar o desempenho de filtros.

Um ressonador CSRR possui a característica principal de apresentar intensa rejeição nas vizinhanças da frequência de ressonância. Níveis de rejeição atingindo 60 dB podem ser obtidos [13], [16], [17]. Desta forma, projetando adequadamente as dimensões dos ressonadores, pode-se usar este comportamento para melhorar, por exemplo, as respostas dos filtros Matrioska de uma seção propostos em [2]. Fig. 3(a) ilustra a configuração

de um ressonador CSRR circular e suas principais dimensões. A dimensão  $c$  representa a espessura dos anéis,  $d$  representa o espaçamento entre os anéis,  $g$  representa o comprimento das fendas usadas e  $r_{ext}$  representa o raio do anel externo.

Fig. 3(b) ilustra a configuração de um ressonador CSRR retangular e suas principais dimensões. A dimensão  $w$  representa a espessura dos anéis,  $s$  representa o espaçamento entre os anéis,  $g$  representa o comprimento das fendas usadas e  $l_{ext}$  representa o raio do anel externo.

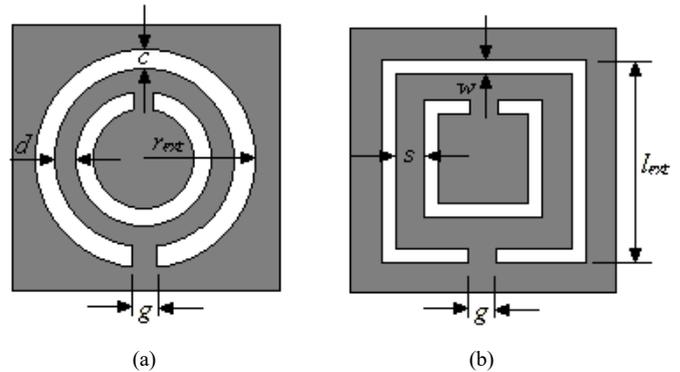


Fig. 3. Principais dimensões físicas de um ressonador CSRR: (a) circular e (b) retangular.

Foi realizado o projeto, de anéis ressonadores, que serão empregados como um DGS (*Defected Ground Structure*) a serem colocados no plano de terra de um filtro rejeita-faixa Matrioska de um estágio, com frequência de corte central de 2,4 GHz. As equações de projeto dos CSRR circular e retangular foram propostas em [18] – [20], respectivamente. Considerando a frequência de ressonância de 2,4 GHz e usando essas equações, os valores obtidos para as dimensões físicas dos CSRR são listados na Tabela I.

TABELA I DIMENSÕES DOS RESSONADORES CSRR PROJETADOS.

CSRR circular				
$r_{ext}$ (mm)	$c$ (mm)	$d$ (mm)	$g$ (mm)	$f_0$ (GHz)
5,5	0,5	0,5	0,5	2,4
CSRR retangular				
$l_{ext}$ (mm)	$w$ (mm)	$s$ (mm)	$g$ (mm)	$f_0$ (GHz)
5,1	0,5	1,0	0,5	2,4

Foram consideradas aberturas idênticas para o anel interno e externo, nos dois tipos de CSRR, circular e retangular.

### IV. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Em [2], os autores propuseram o uso da geometria Matrioska, com dois anéis, objetivando a redução da área ocupada, quando comparado com um filtro com ressonador em C. As simulações mostraram que, comparado com o ressonador em C, o filtro proposto apresentou redução de, aproximadamente, 72% da área ocupada pelo filtro, maior seletividade, apresentando uma banda passante 32% menor e uma região de transição pelo menos 50% menor. Entretanto, a atenuação livre foi reduzida de 42 dB para 17 dB, aproximadamente. Isso pode ser um problema, para algumas aplicações.

Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o programa computacional ANSYS HFSS. Para todas as simulações são adotadas as seguintes especificações: Substrato R03003, de espessura 1,52 mm, constante dielétrica  $\epsilon_r = 3$  e tangente de perdas 0,001;  $w_0 = 3,8$  mm;  $w = 3,8$  mm;  $g = 1,0$  mm;  $L = 60$  mm.

O primeiro filtro (filtro 1) a ser analisado, proposto em [2], foi um filtro rejeita-faixa baseado na geometria Matrioska, com dois anéis. As dimensões dos anéis foram  $L_{1ext} = 11,6$  mm e  $L_{2ext} = 7,6$  mm, o que corresponde a uma área ocupada de  $0,095\lambda_0 \times 0,095\lambda_0$ . Resultados simulados e medidos para esse filtro são ilustrados em Fig. 4. Pode-se observar uma boa concordância entre os resultados. Pode-se observar que a atenuação livre foi reduzida para 16,4 dB, aproximadamente. Isso pode ser um problema para algumas aplicações, por exemplo, que exijam rejeição mínima de 20 dB, dentro de toda a faixa de rejeição.

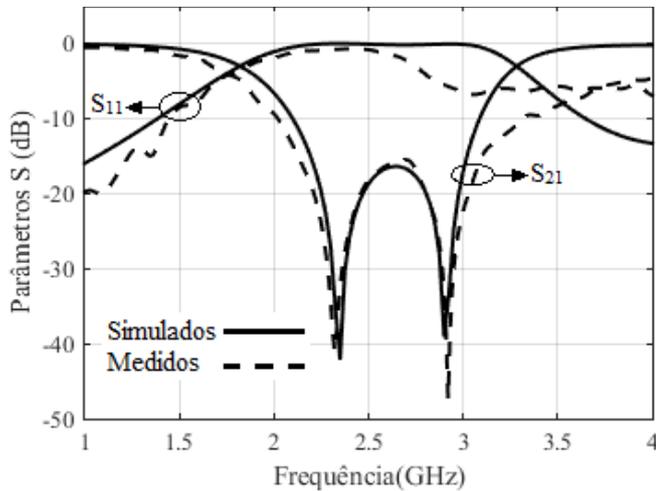


Fig. 4. Parâmetros S para filtro matrioska com dois anéis e área ocupada de  $0,095\lambda_0 \times 0,095\lambda_0$ .

O segundo filtro (filtro2) a ser analisado, proposto em [2], foi um filtro rejeita-faixa baseado na geometria Matrioska, com dois anéis no formato retangular. Isso pode ser interessante quando se deseja implementar um filtro rejeita-faixa ocupando praticamente o espaço da linha de transmissão que alimenta o circuito. Neste contexto, foi fabricado um filtro com o anel externo com  $17,6$  mm  $\times$   $7,0$  mm e o anel interno com  $13,6$  mm  $\times$   $3,0$  mm, o que corresponde a uma área ocupada de  $0,144\lambda_0 \times 0,062\lambda_0$ . Observa-se que ocupando, praticamente, a área da linha de alimentação, obteve-se um filtro com características próximas as do filtro anterior. Resultados simulados e medidos para esse filtro são ilustrados em Fig. 5. Pode-se observar uma boa concordância entre os resultados. A atenuação livre foi de 15,1 dB, aproximadamente.

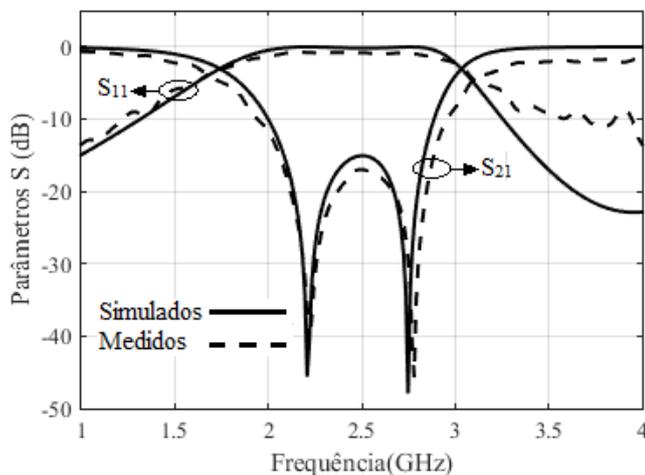


Fig. 5. Parâmetros S para filtro matrioska com dois anéis e área ocupada de  $0,144\lambda_0 \times 0,062\lambda_0$ .

Para contornar a redução da atenuação livre, Gomes Neto *et al.*, em [2], propuseram como solução a utilização de mais um estágio do filtro em série. Foi então implementado um filtro de duas seções em série e o espaçamento entre as seções foi inicialmente estimado e otimizado numericamente até a obtenção da menor distância e a maior atenuação livre. Houve um aumento da atenuação livre para 36 dB.

Apesar de ter conseguido o aumento da atenuação livre, a proposta de [2] levou a um aumento da área ocupada pelo filtro, reduzindo uma das vantagens da proposta de filtro que é a miniaturização. Visando manter essa vantagem, os autores deste estudo propõem a inserção dos CSRR no plano de terra do filtro rejeita-faixa Matrioska com apenas um estágio, para aumentar a atenuação livre e manter a área ocupada pelo mesmo.

Fig. 6 ilustra a disposição dos CSRR circulares no plano de terra do filtro Matrioska de uma seção. A distância entre o centro do filtro e os centros dos anéis é  $d'$ . As dimensões dos anéis já foram listadas na Tabela I.

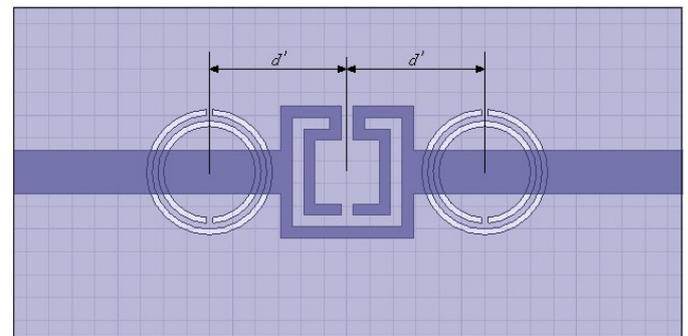


Fig. 6. Disposição dos CSRR circulares no plano de terra.

Inicialmente foi feita uma análise paramétrica, para se obter a distância  $d'$  que fornecesse a maior atenuação livre possível. Partiu-se de uma distância inicial de 6 mm e foi-se incrementando essa distância de 1 mm em 1 mm. Fig. 7 ilustra os resultados simulados para o filtro 1 com a inserção de CSRR circulares. A distância ótima foi de 12 mm e forneceu uma atenuação livre de 30 dB. Foram traçadas as curvas do  $|S_{21}|$  para  $d'$  igual a 6, 8, 10 e 12 mm. Pode-se notar que a distância de 12 mm apresentou os melhores resultados.

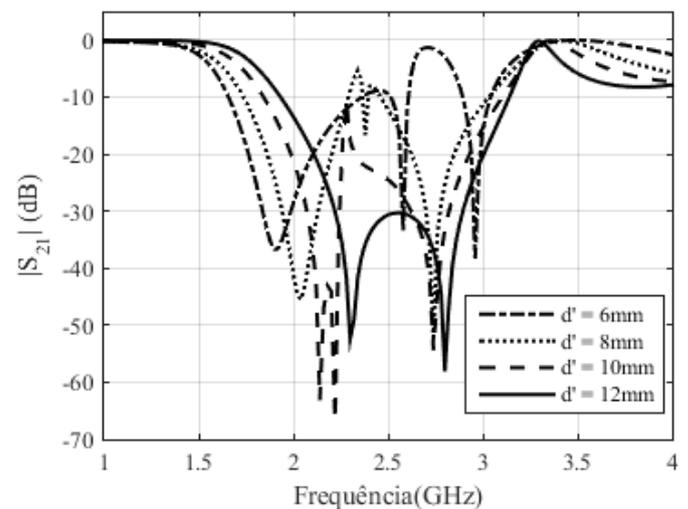


Fig. 7.  $|S_{21}|$  para  $d'$  igual a 6, 8, 10 e 12 mm..

A análise paramétrica feita para o filtro 1 com CSRR circular foi repetida para o filtro 2 com CSRR circular e para ambos os filtros com CSRR retangular. Assim, foram obtidas as distâncias otimizadas,  $d'$ , para cada caso. A Tabela II resume essas simulações.

TABELA II DISTÂNCIA OTIMIZADA PARA POSICIONAMENTO DOS CSRR.

Distância	Filtro 1		Filtro 2	
	CSRR circular	CSRR retangular	CSRR circular	CSRR retangular
$d'$ (mm)	12	8,85	15	11,85

Após obter as distâncias ótimas, foram comparadas as respostas em frequência de  $|S_{21}|$  obtidas para o filtro 1 sem CSRR com as respostas de filtro inserindo os CSRR circulares e retangulares. Essa comparação é ilustrada em Fig. 8. Pode-se observar a melhoria significativa na atenuação livre que a inserção dos CSRR circulares produziu. A atenuação livre era de 17 dB sem os CSRR e aumentou para 30 dB com os CSRR circulares, uma melhoria de 13 dB, deixando toda a faixa de interesse com atenuações superiores a 20 dB. Já para o caso dos CSRR retangulares não houve alteração na atenuação livre, havendo apenas um aumento na seletividade, mas desprezível.

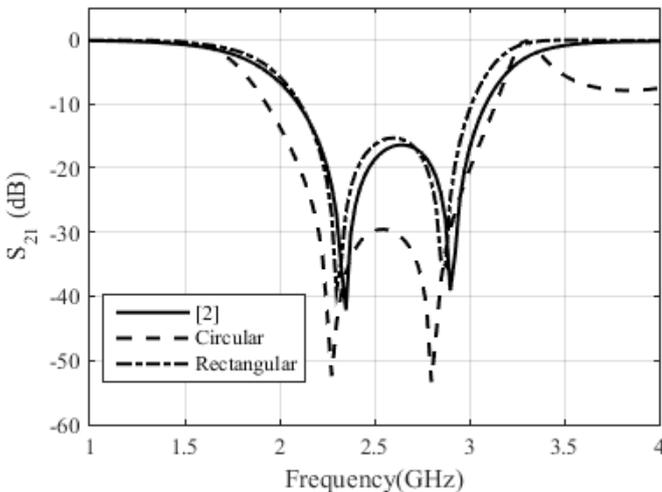


Fig. 8. Resposta de frequência medida do FSS construído para diferentes ângulos de incidência na polarização vertical.

O mesmo foi feito para o filtro 2. Foram comparadas as respostas em frequência de  $|S_{21}|$ , para o filtro 2 sem CSRR com as respostas inserindo os CSRR circulares e retangulares. Essa comparação é ilustrada em Fig. 9. Assim como o filtro 1, pode-se observar a melhoria significativa na atenuação livre que a inserção dos CSRR circulares produziu. A atenuação livre era de 15 dB sem os CSRR e aumentou para 30 dB com os CSRR circulares, uma melhoria de 15 dB, deixando toda a faixa de interesse com atenuações superiores a 20 dB. Já para o caso dos CSRR retangulares não houve alteração na atenuação livre, nem aumento na seletividade, mantendo a resposta inalterável.

Para comprovar a análise efetuada, dois protótipos foram construídos, inserindo os CSRR no plano de terra dos filtros 1 e 2. As medições foram realizadas no Laboratório de Micro-ondas do GTEMA/IFPB, utilizando um analisador de redes Agilent E5071C, conforme pode ser visto em Fig. 10. Fotos dos protótipos construídos podem ser vistas em Fig. 11. Podem ser observadas algumas imprecisões nas estruturas fabricadas, o que pode levar a diferenças entre valores simulados e medidos.

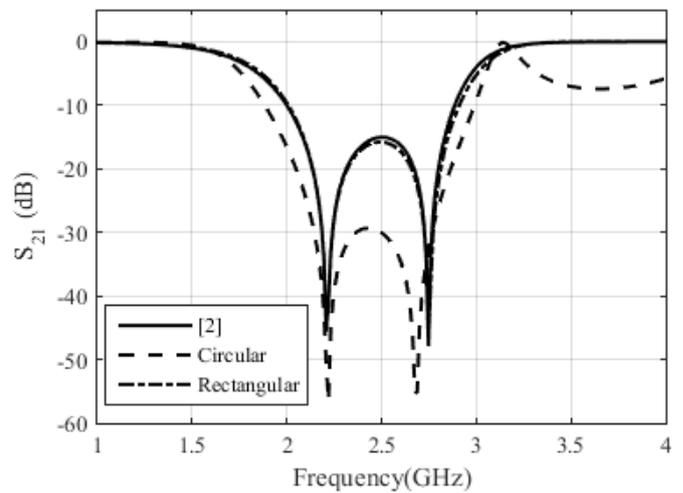


Fig. 9. Resposta de frequência medida do FSS construído para diferentes ângulos de incidência na polarização horizontal.

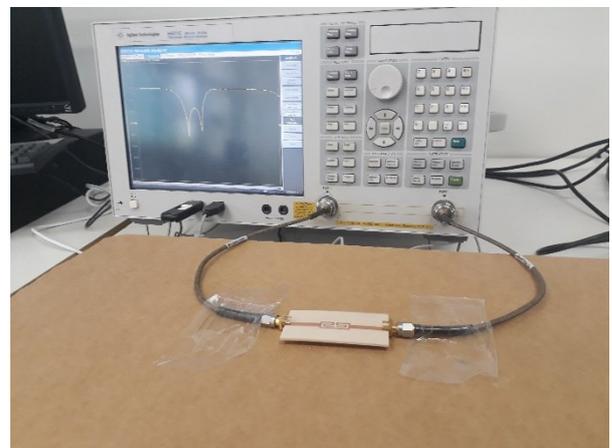


Fig. 10. Setup de medição.



Fig. 11. Protótipos dos filtros 1 e 2 construídos.

Fig. 12 ilustra a comparação entre os coeficientes de transmissão simulados e medidos para o filtro 1, com os CSRR circulares inseridos no plano de terra. Pode-se observar que a atenuação livre aumentou para 30 dB, validando a proposta desse estudo. Ocorre um pico dentro da faixa de rejeição (2 a 3 GHz). Isso pode ter ocorrido devido a imprecisões no processo de fabricação. A análise mostrou que, devido às dimensões reduzidas dos CSRR, qualquer alteração mínima pode causar diferenças significativas ou picos como o que vemos. Entretanto, pode-se considerar que houve uma boa concordância entre os resultados.

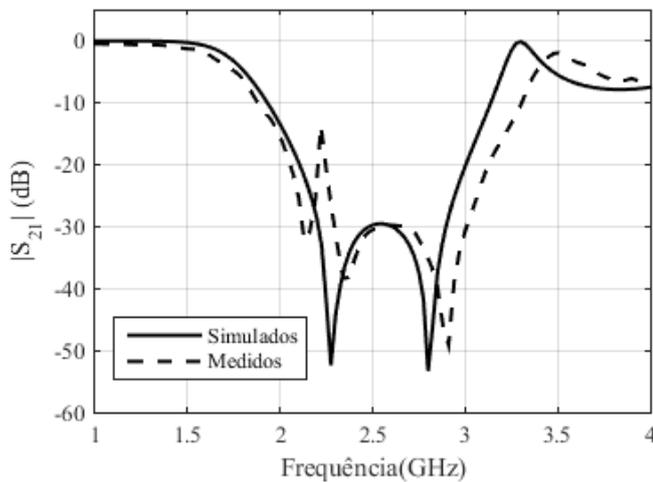


Fig. 12. Comparação entre resultados medidos e simulados para o filtro 1.

Fig. 13 ilustra a comparação entre os coeficientes de transmissão simulados e medidos para o filtro 2, com os CSRR circulares inseridos no plano de terra. Pode-se observar que a atenuação livre também aumentou para 30 dB e também ocorre um pico dentro da faixa de rejeição (2 a 3 GHz). Acredita-se que isso pode ter ocorrido devido a imprecisões no processo de fabricação. Entretanto, também pode-se considerar que houve uma boa concordância entre os resultados.

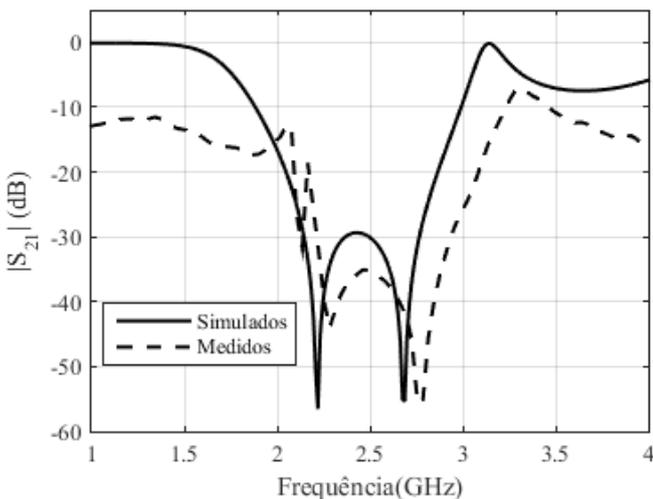


Fig. 13. Comparação entre resultados medidos e simulados para o filtro 2.

## V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi proposta a inserção de CSRR no plano de terra de um filtro Matrioska, para aumentar a atenuação livre. Os resultados medidos mostraram que a proposta atingiu seu objetivo, para CSRR circulares. Não se conseguiu o mesmo para CSRR retangular. O processo de fabricação dos CSRR é crucial, pois pequenas imprecisões podem levar a problemas na resposta em frequência desejada. Mesmo assim, os filtros se mostraram adequados para aplicações na faixa de WLAN. Pretende-se avançar nas pesquisas, otimizando o caso do CSRR retangular e melhorando o processo de fabricação, usando mesa fresadora, ao invés de corrosão.

## REFERÊNCIAS

- [1] Josefa Gilliane de Oliveira Mariano, Implementação de Filtros Planares Baseados na Geometria Matrioska, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2017.
- [2] Em que A. Gomes Neto, A. Flor Neto, M. C. Andrade, J. C. Silva e J. N. Carvalho, Filtro rejeita-faixa compacto com reduzida região de transição para aplicação na faixa de 2,4 GHz. In: XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2018, Campina Grande, PB.v. 1, p. 75-79.
- [3] V. E. Boria, P. Soto, and S. Cogollos, "Distributed models for filter synthesis," IEEE Microwave Magazine, pp. 87-100, October, 2011.
- [4] R. Gomez-García and X. Gong, "Recent trends on RF/Microwave tunable filter design," IEEE Microwave Magazine, July-August, 2014.
- [5] T. C. Edwards and M. B. Steer, Foundations of Interconnect and Microstrip Design, Wiley, 3rd Edition, England, 2000.
- [6] J. S. Hong and M. J. Lancaster, Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, John Wiley & Sons, New York, 2001. W. T. Wang et al., "Compact Angularly Stable Frequency Selective Surface Using Hexagonal Fractal Configurations", Microwave and Optical Technology Letters, (2009), 2541 – 2544.
- [7] A. Gomes Neto, *et al.*, Multiband frequency selective surface with open matryoshka elements, 9th European Conference on Antennas and Propagation, v.1, Lisboa, 2015.
- [8] J. N. Cruz, Caracterização de FSS com Geometria Matrioska Aberta, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2015.
- [9] H. P. A. Ferreira, Matrioska: Uma Proposta de Geometria para FSS Multibandas, Paraíba: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 2014.
- [10] A. Gomes Neto, *et al.*, A proposed geometry for multi-Resonant frequency selective surfaces, In: European Microwave Week 2014 Conference/44th European Microwave Conference (EuMC), European Microwave, Roma, 2014.
- [11] A. Gomes Neto, A. Flor Neto, M. C. Andrade, J. C. Silva e J. N. Carvalho, Filtros em Microfita Utilizando a Geometria Anéis Matrioska Circulares. 18º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e o 13º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2018, Santa Rita do Sapucaí, MG. v. 1. p. 366-370.
- [12] A. Gomes Neto, A. G. Costa, 3 C. S. Moreira, A new planar sensor based on the matryoshka microstrip resonator, 2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2017. v. 1.
- [13] F. Falcone, T. Lopetegi, J. D. Baena, R. Marqués, F. Martín, M. Sorolla, "Effective Negative- $\epsilon$  stopband microstrip lines based on Complementary Split Ring Resonators", IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett., vol. 14, no. 6, pp. 280-282, 2004.
- [14] J. García, F. Martín, F. Falcone, J. Bonache, J. D. Baena, I. Gil, E. Amat, T. Lopetegi, M. A. G. Laso, J. A. M. Iturmendi, M. Sorolla, R. Marqués, "Microwave Filters with improved stopband based on sub-wavelength resonators", IEEE Trans. Microw. Theor. Techn., vol. 53, no. 6, pp. 1997-2006, Jun. 2005.
- [15] J. García-García, F. Martín, F. Falcone, J. Bonache, I. Gil, T. Lopetegi, M. A. G. Laso, M. Sorolla, R. Marqués, "Spurious passband suppression in microstrip coupled line band pass filters by means of split ring resonators", IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett., vol. 14, no. 9, pp. 416-418, Set. 2004.
- [16] J. García-García, J. Bonache, F. Falcone, J. D. Baena, F. Martín, I. Gil, T. Lopetegi, M. A. G. Laso, A. Marcotegui, R. Marqués, M. Sorolla, "Stepped-impedance lowpass filters with spurious passband suppression", Electron. Lett., vol. 40, no. 14, pp. 881-883, Jul. 2004.
- [17] A. Ali, M. A. Khan, Z. Hu, "High Selectivity lowpass filter using negative- $\epsilon$  metamaterial resonators", Electron. Lett., vol. 43, no. 9, pp. 528-530, Abr. 2007.
- [18] C. Saha e J. Y. Siddiqui, Theoretical Model for Estimation of Resonance Frequency of Rotational Circular Split-Ring Resonators, Electromagnetics, Vol. 32, pp. 345–355, 2012
- [19] C. Saha e J. Y. Siddiqui, Versatile CAD Formulation for Estimation of the Resonant Frequency and Magnetic Polarizability of Circular Split Ring Resonators. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 432 - 438, 2011.
- [20] F. Bilotti, A. Toscano, and L. Vegni, Design of Spiral and Multiple Split-Ring Resonators for the Realization of Miniaturized Metamaterial Samples, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 55, No. 8, pp. 2258 - 2267, 2007.