

Superfície Seletiva em Frequência com Três Bandas de Rejeição com Aplicação à Faixa de 2,4 GHz

Alfrêdo Gomes Neto, Jefferson Costa e Silva, Ianes Barbosa Grécia Coutinho, Marina de Oliveira Alencar, Diego Medeiros de Andrade

Resumo—Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma superfície seletiva em frequência, FSS, com três bandas de rejeição, com a banda central aplicada à faixa de frequência de 2,4 GHz. As três bandas de rejeição são obtidas a partir da associação das geometrias dipolos cruzados e anel matrioska. Para cada geometria são propostas as equações iniciais de projetos e apresentados resultados numéricos. Foi projetada, fabricada e caracterizada experimentalmente uma FSS com a geometria proposta, verificando-se uma concordância muito boa entre os resultados numéricos e experimentais, obtendo-se uma atenuação de no mínimo 15 dB na faixa de frequência de 2,4 GHz.

Palavras-Chave — FSS, Matrioska, Dipolos cruzados, Wi-Fi.

Abstract— This paper presents the development of a frequency selective surface, FSS, with three bands of rejection, with the central bandwidth applied to the 2.4 GHz frequency band. The three rejection bands are obtained from the association of crossed dipoles and matrioska ring geometries. For each geometry the initial design equations are proposed and numerical results are presented. A FSS with the proposed geometry was designed, manufactured and characterized, with a very good agreement between numerical and experimental results, obtaining an attenuation of at least 15 dB in the 2.4 GHz frequency band.

Keywords — FSS, Matryoshka, Crossed dipoles, Wi-Fi.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos observa-se um grande crescimento no uso de serviços móveis de telecomunicações. Um dos principais fatores desse crescimento é o desenvolvimento massivo e diverso de dispositivos portáteis, como, por exemplo, *smartphones*, *tablets*, *notebooks*, *laptops*, *e-books readers*, consoles para jogos eletrônicos, entre outros. Esse desenvolvimento tem proporcionado uma verdadeira revolução em diversas áreas da atuação humana, citando-se as interações sociais, educação, saúde, comércio etc. A maior parte dessas aplicações faz uso de conexões via Internet, provocando um aumento da demanda por taxas de transmissão. Considere-se ainda serviços como vídeo *streaming*, comunicação máquina a máquina (M2M, *Machine-to-Machine*) e a diversificação da Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*), fatores que efetivamente contribuem para o crescimento da demanda por taxas de transmissão cada vez mais elevadas [1],[2].

Nesse contexto, considerando as limitações do espectro eletromagnético, a disponibilidade de espaço para instalação de antenas, ambientes com uso intensivo de sistemas de

comunicação sem fio (centros comerciais, edifícios de escritórios etc.), e ambientes sensíveis (presídios, hospitais, embaixadas etc.), torna-se necessário otimizar a utilização de antenas [3]-[6], assim como prover soluções para mitigar interferências ou limitar o acesso aos sistemas de comunicação sem fio [7]-[9]. Para atender a esses requisitos, uma das soluções é a utilização de superfícies seletivas em frequência FSS (*frequency selective surfaces*) [10].

Genericamente, pode-se dizer que uma FSS é um arranjo periódico de elementos tipo condutor (*patch*) ou abertura (*slot*), que apresenta a característica de refletir, transmitir ou absorver ondas eletromagnéticas. Por deixar passar ou bloquear ondas no espaço livre, as FSS são também denominadas filtros espaciais [10], [11]. As aplicações das FSS abrangem uma ampla faixa do espectro eletromagnético, desde as ondas milimétricas até terahertz. Entre essas aplicações, podem ser citadas as antenas com banda dupla de operação [3],[4], [10], [11], antenas reconfiguráveis [5], [6], sensores [12],[13], otimização da eficiência dos sistemas de comunicação [7]-[9] e colheita de energia (*energy harvesting*) [14]. Basicamente, a resposta em frequência da FSS é determinada pelas características do dielétrico, pela geometria da célula unitária, pela periodicidade da FSS e pela polarização da onda incidente, Figura 1.

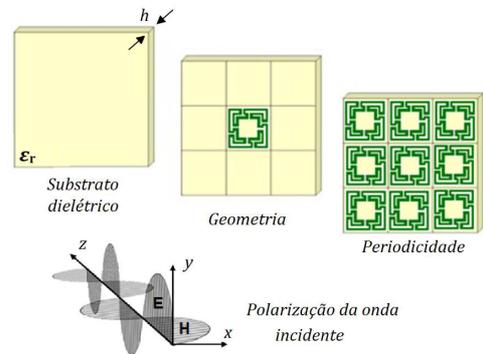


Fig. 1. Fatores que determinam a resposta em frequência da FSS.

Um dos desafios no projeto de FSS é quando são desejadas ressonâncias próximas, como ilustrado na Figura 2, principalmente quando é desejado que a FSS apresente apenas uma camada de metalização [15], [16]. Neste caso, uma das soluções é associar diferentes geometrias para compor a geometria da célula unitária da FSS. Entretanto, para evitar o acoplamento entre as diferentes geometrias é preciso que as respectivas ressonâncias sejam decorrentes de distribuições de campos distintas [16].

Recentemente, foi descrita uma geometria matrioska com características de miniaturização, operação multibanda e independência da polarização [17]. Procurando aproveitar essas

Os autores fazem parte do Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado, do Instituto Federal da Paraíba, GTEMA-IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, E-mail: gtema.ifpb@gmail.com. Este trabalho é parcialmente financiado pelo PPGEE-IFPB e pelo Edital PIBITI 12/2018-IFPB.

características, neste trabalho é apresentada uma FSS com três bandas de rejeição, a partir da associação das geometrias dipolos cruzados e matrioska. A banda de rejeição central é aplicada à faixa de frequência de Wi-Fi em 2,4 GHz, sendo obtida a partir da geometria dipolos cruzados. As duas bandas laterais de rejeição, 1,8 GHz e 3,2 GHz, são obtidas das ressonâncias da geometria matrioska. Para cada geometria são propostas equações iniciais de projetos e é verificado que mesmo com a associação das geometrias, as respectivas ressonâncias permanecem inalteradas, indicando o desacoplamento entre elas. Além dos resultados numéricos, uma FSS com a geometria proposta foi projetada, fabricada e caracterizada experimentalmente, confirmando a resposta em frequência prevista, com uma concordância muito boa entre resultados numéricos e experimentais. Este artigo está organizado da seguinte forma: Na seção I é apresentada uma introdução; na seção II são descritas as etapas de projeto; na seção III são apresentados os resultados numéricos e experimentais; e na seção IV as conclusões.

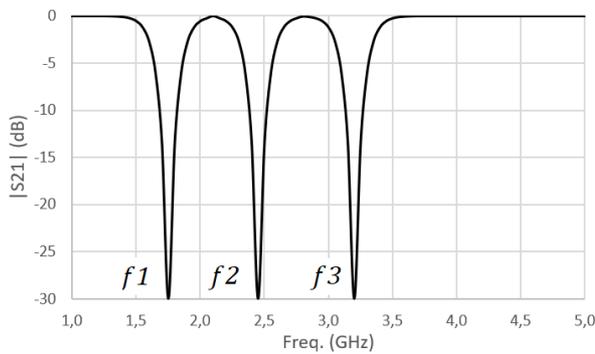


Fig. 2. Resposta em frequência com ressonâncias próximas.

II. PROJETO DA FSS

Nesta seção é descrito o projeto da FSS associando as geometrias dipolos cruzados e matrioska. Considera-se que o substrato tem uma constante dielétrica ϵ_r e uma espessura h .

O dipolo cruzado é uma geometria bastante simples, para a qual a frequência de ressonância ocorre quando o seu comprimento é aproximadamente a metade do comprimento de onda guiado, Figura 3.

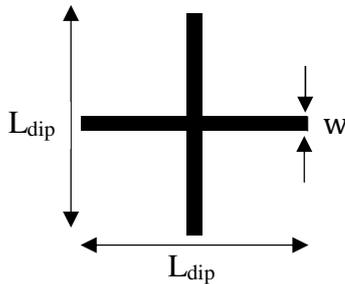


Fig. 3. Geometria dipolos cruzados.

A geometria matrioska foi inicialmente descrita em [19], [20]. Diferentemente dos anéis concêntricos, na geometria matrioska os anéis permanecem interligados, aumentando o seu comprimento efetivo, apresentando, consequentemente, características de miniaturização e operação multibanda. Entretanto, essa geometria era dependente da polarização. A geometria considerada neste trabalho é baseada em uma variação da geometria matrioska apresentada em [21], [22] que é independente da polarização, Figura 4. Note que a geometria

apresentada na Figura 4 é contínua e assim sendo, o seu comprimento efetivo é maior que o perímetro da geometria mais externa ($2Lx1 + 2Ly1$). Geralmente, as dimensões ao longo de x e y são iguais e $Lxi = Lyi = Li$, $dx_i = dy_i = di$, $i = 1,2,3$.

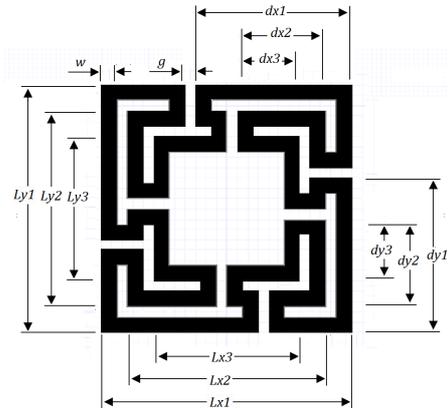


Fig. 4. Geometria matrioska - Um anel matrioska.

A determinação das dimensões da geometria é geralmente um processo iterativo, baseado na experiência do projetista, onde a partir de um valor inicial é realizada uma otimização numérica. Entretanto, equações que estabeleçam o valor inicial das frequências de ressonância podem auxiliar no projeto das FSS. Baseado na experiência acumulada no GTEMA-IFPB, são propostas as equações a seguir.

-Comprimento o dipolo, L_{dip} :

$$L_{dip} = \frac{3 \times 10^8}{2f_{res} \sqrt{\epsilon_{ref-dip}}} \quad (1)$$

Sendo f_{res} a frequência de ressonância desejada e $\epsilon_{ref-dip}$ dado por:

$$\epsilon_{ref-dip} = \frac{\epsilon_{ref-MS} + \epsilon_{ref-CPW}}{2} \quad (2)$$

Onde:

ϵ_{ref-MS} é a constante dielétrica efetiva de uma microfita, considerando a largura da fita igual à largura w do dipolo e espessura igual à espessura do dielétrico h .

$\epsilon_{ref-CPW}$ é a constante dielétrica efetiva de uma guia de ondas coplanar (CPW) sem plano terra, onde a largura da fita central é igual à largura do dipolo w e o espaçamento entre a fita central e os planos coplanares é $10h$.

Os valores de ϵ_{ref-MS} e $\epsilon_{ref-CPW}$ podem ser calculados utilizando aplicativos como o AppCAD [18].

-Primeira ressonância da geometria matrioska:

$$f_{res1} = \frac{3 \times 10^8}{L_{ef1} \sqrt{\epsilon_{ref-CPW}}} \quad (3)$$

Sendo

$$L_{ef1} = 3(L_1 - 2w) + 2(L_2 - 2w) + 3(L_3 - 2w) \quad (4)$$

-Segunda ressonância da geometria matrioska:

$$f_{res2} = \frac{3 \times 10^8}{\left(L_{ef2}/2\right) \sqrt{\epsilon_{ref-CPW}}} \quad (5)$$

Sendo

$$L_{ef2} = 3L_1 + 2L_2 + 3L_3 \quad (6)$$

Vale ressaltar que as equações (1)–(6) fornecem valores iniciais, que devem ser verificados e otimizados numericamente.

Associando as duas geometrias, obtém-se a geometria apresentada na Figura 5. Note que, para facilitar a visualização, a geometria matrioska não foi repetida em torno da célula unitária, Figura 6.

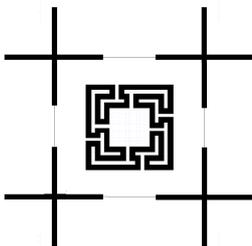


Fig. 5. Associação das geometrias dipolos cruzados e matrioska.

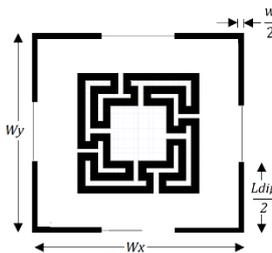


Fig. 6. Célula unitária da FSS com as geometrias dipolos cruzados e matrioska.

III. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o programa comercial ANSYS Designer [23], considerando a condição de periodicidade, o que possibilita a simulação apenas de uma célula unitária. É considerado um substrato FR4, de espessura $h = 1,6 \text{ mm}$, constante dielétrica $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas $tg(\delta) = 0,02$. Cada célula unitária tem $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ e a incidência é perpendicular à FSS. Como a geometria é independente da polarização, os resultados são apresentados apenas para a polarização y .

A caracterização experimental foi realizada no Laboratório de Micro-ondas do GTEMA-IFPB, utilizando duas antenas cornetas banda larga SAS-571, um analisador de redes vetorial de duas portas, VNA Agilent E5071C e uma janela de medição, Figura 7.

Na Figura 8 é apresentada a resposta em frequência para geometria dipolos cruzados, sendo $L_{dip} = 39,0 \text{ mm}$ e $w = 1,5 \text{ mm}$. Observa-se uma ressonância em $2,46 \text{ GHz}$, valor muito próximo ao calculado a partir de (1), que é $2,45 \text{ GHz}$.

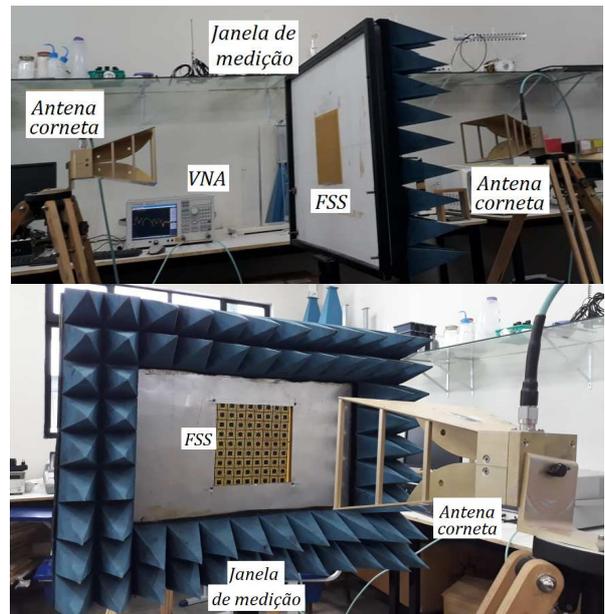


Fig. 7. Setup de medição.

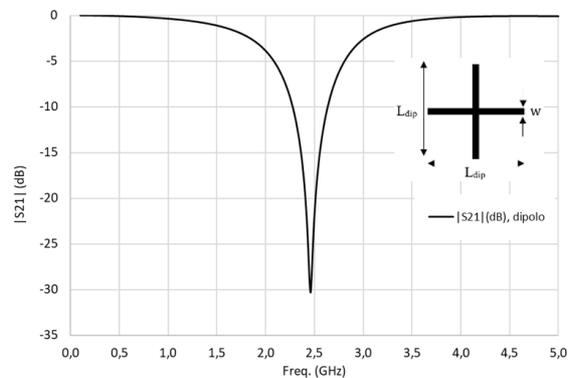


Fig. 8. Resposta em frequência para o dipolo cruzado, $L_{dip} = 39 \text{ mm}$, $w = 1,5 \text{ mm}$.

Na Figura 9 é apresentada a resposta em frequência para geometria matrioska, sendo $w = 1,5 \text{ mm}$, $g = 1,0 \text{ mm}$, $L_1 = 24,0 \text{ mm}$, $L_2 = 19,0 \text{ mm}$, $L_3 = 14,0 \text{ mm}$, $d_1 = 15,0 \text{ mm}$, $d_2 = 8,5 \text{ mm}$, $d_3 = 6,0 \text{ mm}$. São observadas duas frequências de ressonância, uma em $1,82 \text{ GHz}$ e a outra $3,18 \text{ GHz}$. Comparados com os resultados obtidos com (3), $1,83 \text{ GHz}$, e (5), $3,27 \text{ GHz}$, verifica-se uma aproximação inicial muito boa, com uma diferença de $0,31\%$ e $2,73\%$, respectivamente. Destaque-se ainda uma redução da frequência de ressonância de $25,6\%$, de $2,46 \text{ GHz}$ para $1,82 \text{ GHz}$, quando comparadas as geometrias matrioska e dipolos cruzados, mesmo os dipolos cruzados sendo $62,5\%$ maior que a matrioska, $39,0 \text{ mm}$ e $24,0 \text{ mm}$, respectivamente.

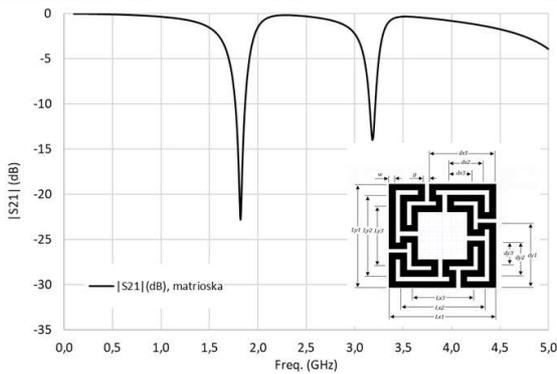


Fig. 9. Resposta em frequência para um anel matrioska.

Na Figura 10 é apresentada a resposta em frequência para as duas geometrias associadas. São observadas três frequências de ressonâncias, 1,81 GHz, 2,43 GHz e 3,19 GHz, sendo que a primeira e a terceira ressonâncias estão associadas à geometria matrioska e a segunda aos dipolos cruzados. Verifica-se ainda que essas frequências de ressonância praticamente não se deslocaram em relação aos valores das geometrias isoladas, indicando um baixo acoplamento entre as geometrias associadas.

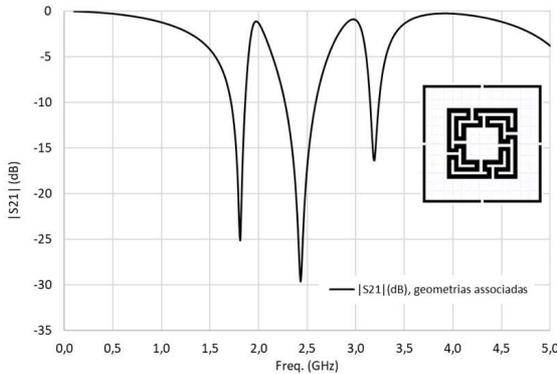


Fig. 10. Resposta em frequência para as geometrias dipolos cruzados e matrioska associadas.

Para verificar experimentalmente o comportamento da associação das geometrias proposta, foi projetada, fabricada e caracterizada experimentalmente uma FSS com as mesmas dimensões e material da célula unitária apresentada na Figura 10. A FSS tem 5×5 células unitárias, o que corresponde a $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$, Figura 11. Na Figura 12 são comparados os resultados numéricos e experimentais, verificando-se uma boa concordância. A medição foi realizada na faixa de frequência de 1,0 GHz a 5,0 GHz e a maior diferença entre os resultados experimentais e simulados observada no início dessa faixa de frequência decorre das limitações do *setup* de medição. São confirmadas as três frequências de ressonância. Os resultados obtidos são resumidos na Tabela I.

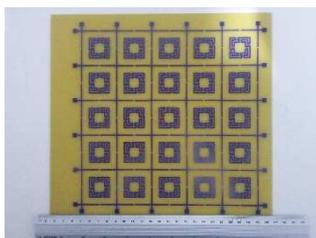


Fig. 11. FSS fabricada.

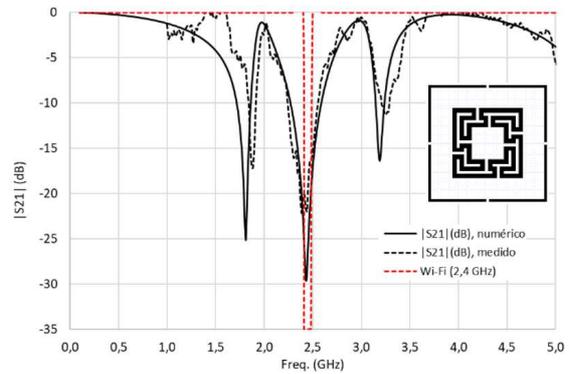


Fig. 12. Comparação dos resultados experimentais e simulados para a FSS com as geometrias dipolos cruzados e matrioska associadas.

TABELA I - FSS COM AS GEOMETRIAS DIPOLOS CRUZADOS E MATRIOSKA ASSOCIADAS – FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIAS.

	f_{res1}	f_{res2}	f_{res3}
<i>Simulado</i>	1,81 GHz	2,43 GHz	3,19 GHz
<i>Medido</i>	1,88 GHz	2,43 GHz	3,25 GHz
<i>Diferença</i>	3,7%	0,0%	1,8%

IV. CONCLUSÕES

O projeto de uma FSS cuja geometria da célula unitária é resultado da associação das geometrias dipolos cruzados e anel matrioska foi apresentado neste artigo. Como essas geometrias são praticamente desacopladas, uma das vantagens alcançadas foi a manutenção das frequências de ressonâncias de cada geometria, possibilitando a obtenção de uma FSS com três bandas de rejeição, sendo a banda central aplicada à faixa de 2,4 GHz. As equações iniciais de projeto apresentaram bons resultados, com uma diferença menor que 3%, quando comparados aos resultados numéricos. A FSS caracterizada experimentalmente confirmou a resposta em frequência prevista, tendo sido obtida uma atenuação de no mínimo 15 dB na faixa de 2,4 GHz.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte parcial recebido do IFPB, através do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE-IFPB e do Edital PIBITI 12/2018-IFPB.

REFERENCES

- [1] Cisco Visual Networking, “Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2017–2022” <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.html>. [Acesso em 6 de março 2019]
- [2] Ibraheem Shayea, Marwan Hadri Azmi, Tharek Abd. Rahman, Mustafa Ergen, Chua Tien Han, and Arsany Arsad, “Spectrum gap analysis with practical solutions for future mobile data traffic growth in Malaysia,” *IEEE Access*, 24910-24933, Mar. 2019.
- [3] Tiago Henrique Brandão, Antenas Parabólicas de Banda Dupla Baseadas em FSS para Radares e Comunicação, Dissertação de Mestrado, INATEL, Santa Rita do Sapucaí, MG, PB, Brasil, 2019.
- [4] T.H. Brandão, H. R. D. Filgueiras, Juliano F. Mologni, Antonella Bogoni and Arismar Cerqueira S. Jr., “FSS-based dual-band Cassegrain Parabolic antenna for radarcomm applications,” *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Águas de Lindóia, SP, 2017, pp. 1-5.

- [5] M. Bouslama, M. Traii, T. A. Denidni, and A. Gharsallah, "Beam-switching antenna with a new reconfigurable frequency selective surface," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 15, pp. 1159–1162, 2016.
- [6] João R. Reis, Akram Hammoudeh, Nigel Copner, Telmo Fernandes, Rafael F. S. Caldeirinha, "2D Agile beamsteering using an electronically reconfigurable transmitarray," *13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2019)*, Krakow, Poland, Mar. 31-Apr. 5, 2019, pp. 1-5.
- [7] S. Cho, I. Lee and I. Hong, "Frequency selective film design for building walls for blocking wireless LAN signal," *2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Busan, Korea (South), 2018, pp. 1-2.
- [8] S. Habib, G. I. Kiani, and M. F. U. Butt, "Interference mitigation and WLAN efficiency in modern buildings using energy saving techniques and FSS," in *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, Fajardo, Puerto Rico, July, 1, 2016, pp. 965–966.
- [9] C. J. Davenport, J. M. Rigelsford, J. Zhang and H. Altan, "Periodic comb reflection frequency selective surface for interference reduction," *2013 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, Loughborough, 2013, pp. 615-618.
- [10] Ravi Panwar, Jung Ryul Lee, "Progress in frequency selective surface-based smart electromagnetic structures: A critical review," *Aerospace Science and Technology*, (66), pp. 216–234, 2017
- [11] John C. Vardaxoglou, *Frequency Selective Surfaces – Analysis and Design*, Research Studies Press, England, 1997.
- [12] M. Mahmoodi and K. M. Donnell, "Active frequency selective surface for strain sensing," in *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego, California, USA, July 2017, pp. 675–676.
- [13] S. Milici, A. Lazaro, J. Lorenzo, R. Villarino, D. Girbau, "Wearable sensors based on modulated frequency selective surfaces," in *47th European Microwave Conference (EuMC)*, Nuremberg, 2017, pp. 942-945.
- [14] F. Erkmen, T. S. Almonneef and O. M. Ramahi, "Scalable electromagnetic energy harvesting using frequency selective surfaces," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 5, pp. 2433-2441, May 2018.
- [15] S. Genovesi, F. Costa and A. Monorchio, "Design of compact multiband frequency selective surfaces with meandered elements," *2017 47th European Microwave Conference (EuMC)*, Nuremberg, 2017, pp. 604-607.
- [16] A. G. Neto, J. C. e. Silva, J. B. d. O. Silva and C. Peixeiro, "A dual-band frequency selective surface using four arms star geometry associated to trapezoidal rings for WiFi applications," *2017 47th European Microwave Conference (EuMC)*, Nuremberg, 2017, pp. 791-794.
- [17] A. G. Neto, T. R. de Sousa, J. C. E. Silva and D. F. Mamedes, "A polarization independent frequency selective surface based on the matryoshka geometry," *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS*, Philadelphia, PA, 2018, pp. 999-1002.
- [18] <http://www.hp.woodshot.com>
- [19] Hillner de Paiva Almeida Ferreira, *Uma Proposta de Geometria para FSS Multibandas*, Dissertação, PPGEE, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2014.
- [20] A. Gomes Neto, A. G. DAssunção, J. C. e. Silva, A. N. d. 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.
- [21] Thayuan Rolim de Sousa, *Desenvolvimento de Superfícies Seletivas em Frequência Baseadas na Geometria Matrioska Independente da Polarização*, Dissertação, PPGEE, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2019.
- [22] A. G. Neto, T. R. de Sousa, J. C. E. Silva and D. F. Mamedes, "A polarization independent frequency selective surface based on the matryoshka geometry," *2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS*, Philadelphia, PA, 2018, pp. 999-1002.
- [23] <http://www.ansys.com>.