

Projeto de Metassuperfície Multifuncional para Absorção, Conversão de Polarização e Transmissão Simultaneamente

Thayana Mayrink Lessa de Sousa, Francisco Diego Martins Nobre, Antônio Luiz P. de Siqueira Campos e Maurício Weber Benjó da Silva

Resumo— Este artigo apresenta uma metassuperfície fina, de camada única, capaz de realizar simultaneamente absorção, conversão de polarização e transmissão seletiva. A estrutura é composta por subressonadores formados por espiras e um patch quadrado com corte diagonal, impressos em substrato e cobertos por superstrato. O plano de terra é substituído por uma superfície seletiva em frequência. A célula unitária possui picos de absorção de 93,77% e 97,99% em 3,58 e 5,58 GHz (5G e WLAN), PCR acima de 90% na faixa de 9,59 a 10,05 GHz (banda X), enquanto permite transmissão em 4,60 GHz (banda C). Até onde os autores têm conhecimento, não há registros anteriores de estrutura equivalente em camada única.

Palavras-Chave— *Metassuperfície, absorção, conversão de polarização, transmissão.*

Abstract— This article presents a thin, single-layer metasurface capable of simultaneously performing absorption, polarization conversion, and selective transmission. The design includes sub-resonators with square loops and a diagonally cut patch, printed on a substrate and covered by a superstrate. The ground plane is replaced by a frequency selective surface. The unit cell achieves 93.77% and 97.99% absorption at 3.58 and 5.58 GHz (5G and WLAN), polarization conversion ratio above 90% from 9.59 to 10.05 GHz (X band), and allows transmission at 4.60 GHz (C band). To the authors' knowledge, no similar single-layer structure combining all three functions has been reported.

Keywords— *Metasurface, absorption, polarization conversion, transmission.*

I. INTRODUÇÃO

Metamateriais são geralmente definidos como materiais artificiais compostos por elementos metálicos ou dielétricos com dimensões inferiores ao comprimento de onda, permitindo o desenvolvimento de dispositivos com células unitárias e espessura significativamente menores do que o comprimento de onda de operação [1]. Como versão bidimensional desses materiais, as metassuperfícies oferecem vantagens como perfil ultrafino, leveza e possibilidade de controle preciso sobre a resposta eletromagnética, com largura de banda ajustável [2]. Essas estruturas têm sido amplamente aplicadas em sensores, radares de alta resolução, sistemas de comunicação de alta velocidade e monitoramento ambiental [3–6], por meio de arquiteturas específicas como conversores de polarização [7,8] e

absorvedores eletromagnéticos capazes de reduzir o retroespalhamento [9,10].

Tanto os absorvedores quanto os conversores de polarização têm sido intensamente investigados devido à sua capacidade de manipular ondas eletromagnéticas de forma eficiente. Enquanto os primeiros são projetados para absorver e dissipar a energia incidente, os segundos atuam na modificação do estado de polarização das ondas [11]. Nos últimos anos, o foco das pesquisas tem se ampliado para o desenvolvimento de metassuperfícies multifuncionais, especialmente voltadas à operação em múltiplas bandas de frequência. Dentre as funcionalidades mais buscadas, destacam-se a absorção, a conversão de polarização e a transmissão seletiva [12–15]. Essas funções geralmente requerem estruturas complexas, como geometrias multicamadas, grandes conjuntos de ressonadores ou a inclusão de dispositivos ativos como diodos PIN [16–18]. Entretanto, observa-se que a maioria das soluções propostas até o momento alcança no máximo duas dessas funcionalidades simultaneamente.

Neste contexto, este trabalho propõe uma metassuperfície multifuncional fina, de camada única, capaz de operar como absorvedor, transmissor e conversor de polarização ao mesmo tempo. A célula unitária da estrutura proposta é composta por espiras quadradas e um patch com corte diagonal, impressos sobre um substrato dielétrico e cobertos por um superstrato. O plano de terra contínuo, comum nos estudos que propõem estruturas multifuncionais, é substituído por uma FSS (*Frequency Selective Surface*) que reflete apenas as frequências de interesse. O projeto e a análise eletromagnética da estrutura foram realizados no software CST *Studio Suite*, considerando os parâmetros de absorção, transmissão e conversão de polarização. As principais contribuições deste trabalho são o design compacto, a simplicidade construtiva e a capacidade de desempenho multifuncional simultâneo, características que a distinguem das estruturas de camada única encontradas na literatura atual.

II. PROJETO DA CÉLULA UNITÁRIA

Com o objetivo de projetar uma estrutura que atue como absorvedor, transmissor e conversor de polarização, uma estrutura dielétrico-metal-dielétrico-metal (DMDM) composta por células unitárias com ressonador simétrico foi usada para atuar como absorvedor de banda estreita, ressonadores assimétricos para obter conversão de polarização, enquanto a FSS no plano de terra permite a passagem de sinais fora das bandas de interesse. A Figura 1 apresenta as geometrias que

Thayana Mayrink Lessa de Sousa, Maurício W. B. Silva, Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, e-mail: (thayana mayrink, mauriciobenjo)@id.uff.br; Francisco Diego Martins Nobre, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Roraima, Boa Vista-RR, e-mail: nobredie@gmail.com; Antônio Luiz P. de Siqueira Campos, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.

compõem a célula unitária da metasuperfície proposta. Na Figura 1(a) é apresentado o plano de terra de terra seletivo, composto por FSS com espiras quadradas, enquanto a Figura 1(b) mostra os elementos da camada frontal, também de espiras quadradas e com um *patch* com cortes na diagonal. A Figura 1(c) mostra a vista lateral da estrutura. Para que a estrutura atue de forma eficiente, a espessura do dielétrico deve ser muito menor que o comprimento de onda, a fim de evitar deslocamento de fase das ondas EM e múltiplas reflexões. Além disso, foi utilizado o cobre como camada metálica, com condutividade elétrica σ de $5,8 \times 10^7$ S/m e espessura $t = 35 \mu\text{m}$. A camada dielétrica usada foi o FR-4, com permissividade relativa de 4,4 e tangente de perda de 0,02. A espessura da camada dielétrica é $h_1 = 2,4$ mm e o superstrato tem espessura $h_2 = 0,8$ mm. As dimensões geométricas da estrutura (em milímetros) são mostradas na Figura 1, na qual $d_1 = 14,0$, $d_2 = 10,0$, $d_3 = 10,40$, $d_4 = 7,2$, $d_5 = 5,5$, $w_1 = w_2 = 2,0$, $w_3 = w_4 = w_5 = 0,6$, $c = 0,3$, $p = 17,0$.

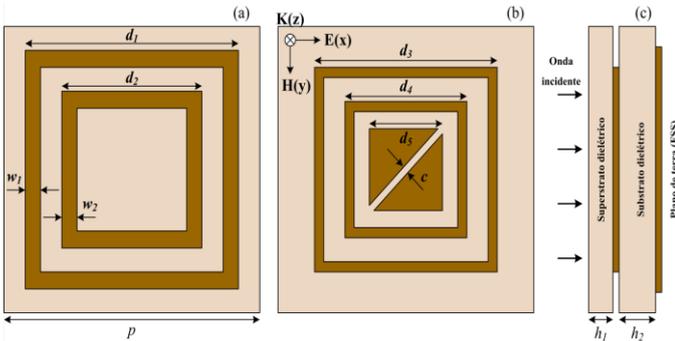


Fig. 1. (a) Célula unitária vista plano terra com FSS; (b) Célula unitária vista superior; (c) Célula unitária vista lateral.

III. ANÁLISE

A. Função Absorvedor

Como primeira análise, é verificado se a célula unitária da metasuperfície proposta apresenta dimensões subcomprimento de onda, característico destas estruturas. Como mencionado na seção II, a periodicidade da célula unitária é $p = 17$ mm, equivalente a $0,198\lambda$ e $0,303\lambda$ nas frequências de absorção de 3,58 GHz e 5,58 GHz, respectivamente. Assim, a periodicidade do absorvedor é muito menor que o comprimento de onda e atende ao requisito de periodicidade de um metamaterial. Além disso, a espessura do absorvedor é de $0,03733\lambda$ e $0,05765\lambda$, o que significa que sua espessura também é muito menor que o comprimento de onda. Diante dessas considerações, o absorvedor proposto pode ser considerado uma metasuperfície, visto que suas dimensões são subcomprimento de onda, diferentemente de uma FSS, cuja frequência de projeto está diretamente associada ao comprimento elétrico da estrutura.

Para analisar o desempenho da absorção pode-se utilizar a teoria do meio efetivo [19], devido ao fato de a metasuperfície ser uma estrutura periódica de subcomprimento de onda. A eficiência de absorção pode ser estimada em termos da sua absorptividade definida por [20], [21]:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega), \quad (1)$$

onde $A(\omega)$ é a absorptividade, $R(\omega)$ é a refletância, $T(\omega)$ é a transmitância e ω é a frequência angular, definidos por:

$$R(\omega) = |r_{yy}|^2 + |r_{xy}|^2, \quad (2)$$

$$T(\omega) = |t_{yy}|^2 + |t_{xy}|^2, \quad (3)$$

$$\begin{cases} r_{yy} = E_{yr}/E_{yi} \\ r_{xy} = E_{xr}/E_{yi} \end{cases}, \quad (4)$$

onde r_{yy} , r_{xy} , t_{yy} e t_{xy} representam componentes de reflexão e transmissão de co-polarização e polarização cruzada, respectivamente.

Neste estudo, para verificar a estabilidade sob incidência angular da estrutura proposta, foi investigada a absorptividade sob incidência oblíqua tanto para a polarização TE, Figura 2, quanto para a TM, Figura 3. Como observado, a estrutura mantém taxa de absorção acima de 90% para ângulos de incidência oblíquos de até 30° para ambas as polarizações, o que mostra alta estabilidade angular.

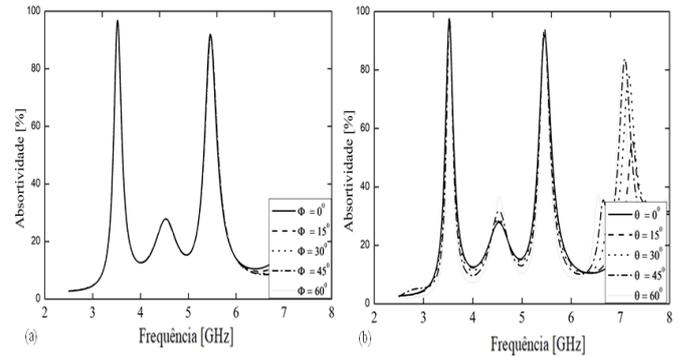


Fig. 2. Absortividade para ondas EM polarizadas no modo TEM para (a) incidência normal; (b) incidência oblíqua.

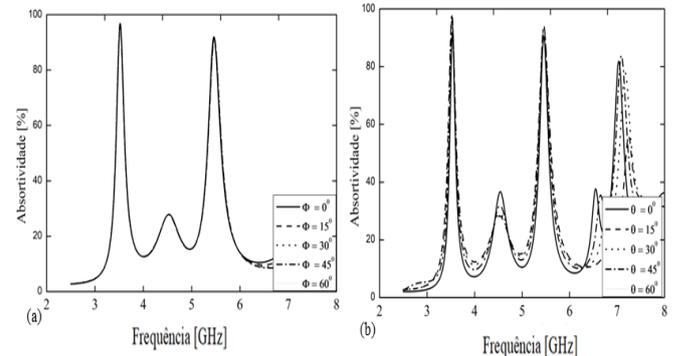


Fig. 3. (a) Gráfico da Absortividade variando com relação a ϕ , para uma onda TM; (b) Gráfico da Absortividade variando com relação a θ , para uma onda TM.

B. Função Conversor de Polarização

Para demonstrar que a metassuperfície proposta possui conversão de polarização eficiente, calculamos a PCR (taxa de conversão de polarização) para onda incidente polarizada em y, que é definida como [23]:

$$PCR = \frac{|r_{xy}|^2}{|r_{yy}|^2 + |r_{xy}|^2}, \quad (5)$$

Como mostrado na Figura 4, a PCR é superior a 90% na faixa de frequência 9,59 GHz a 10,05 GHz, com um pico de 97,39%, o que implica que a polarização é adequadamente convertida em sua forma de onda de polarização cruzada e que o dispositivo atua como um conversor de polarização linear eficiente. Também foi investigada a PCR para incidência oblíqua. Como observado na Figura 4, na função conversor a estrutura apresenta independência de polarização e alta taxa de conversão para ângulos de incidência oblíquos de até 30° apenas para o modo TE. Para maiores valores de incidência angular, há forte redução da taxa e largura de banda de conversão.

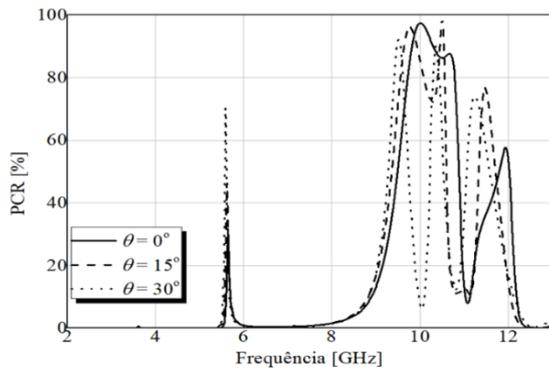


Fig. 4. Gráfico PCR variando com relação a θ , para uma onda TE.

C. Função Transmissor

A estrutura também funciona realizando transmissão que pode ser calculada por [22]:

$$T_{ux} = \sqrt{|T_{xx}|^2 + |T_{xy}|^2}, \quad (6)$$

A Figura 5 mostra a transmissão em função da frequência [GHz], para ondas TE e TM respectivamente. A transmissão ocorre em 4,6 GHz, e diante das variações angulares até 60 graus para ambas as polarizações o transmissor proposto apresenta estabilidade angular na frequência de operação.

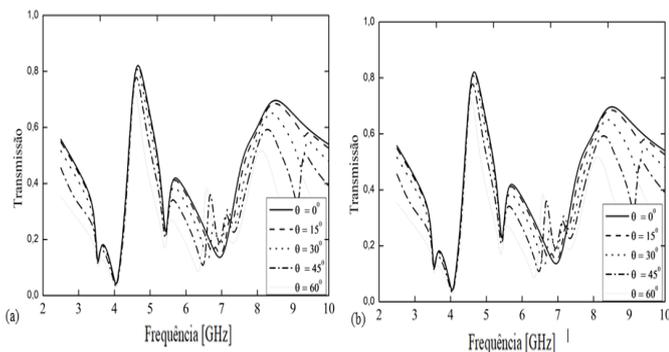


Fig. 5. (a) Gráfico da Transmissão variando com relação a θ , para uma onda TE; (b) Gráfico da Transmissão variando com relação a θ , para uma onda TM.

D. Mecanismos Físicos

Para melhor apresentar os mecanismos físicos tanto da absorção quanto da conversão de polarização da metassuperfície proposta, mapas da distribuição de corrente de superfície nas camadas superior e inferior e distribuição do campo elétrico são simulados nos picos de absorção e de conversão de polarização, onde a presença de dipolos elétricos e/ou magnéticos, fornecem respostas de ressonância elétrica e/ou magnética. Assim, a densidade da corrente de superfície e a distribuição do campo elétrico nos picos de absorção, a saber 3,58, e 5,58 GHz, são mostradas nas Figuras 6 e 7, respectivamente. Esta análise mostra a presença de dipolos elétricos e/ou magnéticos, que fornecem respostas de ressonância elétrica e/ou magnética. Como observado, quando comparada com a camada superior, a intensidade de corrente superficial no plano terra é mais fraca, isso se deve ao fato de a intensidade da onda decair à medida que a onda viaja pela estrutura. Além disso, é possível observar nas duas frequências que as correntes são antiparalelas, o que resulta na circulação de corrente perpendicular ao campo magnético aplicado dentro da estrutura, que excita um dipolo magnético. Assim, uma ressonância magnética é identificada nas frequências de 3,58 e 5,58 GHz.

A Figura 7 mostra a distribuição do campo elétrico na estrutura, considerando uma onda EM com incidência normal em x. É possível notar ainda fortes acoplamentos elétricos entre segmentos adjacentes das espiras, o que indica a presença de correntes de deslocamento, e, assim, nota-se a presença de ressonância magnética. Portanto, na função absorvedor, as respostas magnéticas são responsáveis pelos picos de absorção.

Igualmente como analisado para o absorvedor, para melhor compreender o mecanismo de conversão do metamaterial proposto, as distribuições de correntes superficiais no topo e no plano terra na frequência central de conversão de 9,82 GHz são plotadas, como pode ser visto na Figura 8. Analisando as correntes de superfície é possível notar que as densidades de corrente são paralelas, e assim, uma ressonância elétrica é identificada em 9,82 GHz. A Figura 9 mostra a distribuição do campo elétrico na estrutura, considerando uma onda EM com incidência normal em x. O campo elétrico está distribuído ao redor do *patch* quadrado central, podendo observar um forte acoplamento magnético entre elementos adjacente, indicando a presença de ressonâncias elétricas.

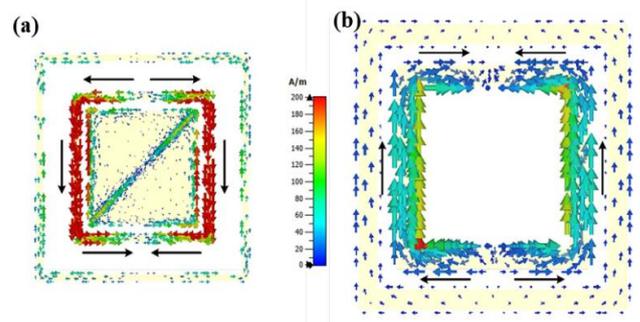


Fig. 6. (a) Densidade de corrente superficial simulada para o absorvedor proposto em 3,58 GHz e 5,58 GHz mostrando em (a) parte superior da célula unitária; (b) plano de terra.

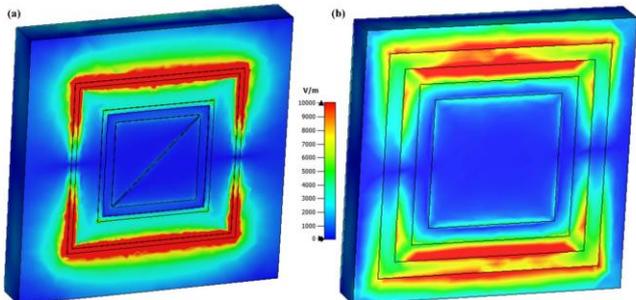


Fig. 7. (a) Distribuição do campo elétrico no absorvedor proposto, corte em $z = 0$ (a) Parte superior; (b) Plano de terra.

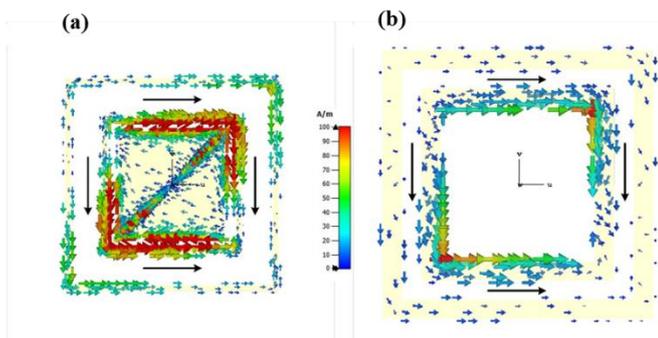


Fig. 8. (a) Densidade de corrente superficial simulada para o conversor proposto mostrando em (a) parte superior da célula unitária; (b) plano de terra.

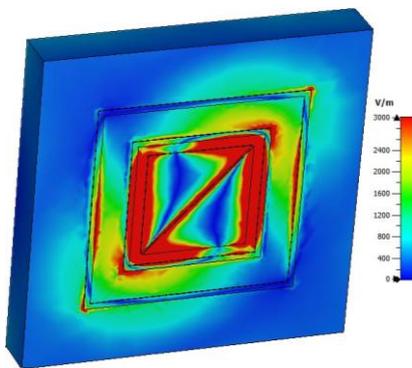


Fig. 9. Distribuição do campo elétrico no conversor de polarização proposto, corte em z .

IV. EVOLUÇÃO DA ESTRUTURA

Para chegar até a estrutura final, apresentada na seção II e analisada na seção III, com as funções de absorver, converter polarização e transmitir, quatro etapas foram realizadas, onde foi possível coletar os resultados obtidos para fins de comparação, conforme apresentados nas Figuras 10, 11 e 12, para cada uma das funções.

Dessa forma, inicialmente foi projetada uma metasuperfície com espiras quadradas, com as mesmas dimensões apresentadas na Figura 1(b), porém sem o *patch* com corte, mantendo a simetria da estrutura, com o plano de terra cheio e sem o superestrato (Etapa 1). Assim, foi obtido um absorvedor operando em 4,14 GHz e 6,68 GHz, com absortividade de 83,57% e 94,45% respectivamente. Com o objetivo de agregar mais uma função, na estrutura da etapa anterior, foi inserido um *patch* com corte na diagonal, Figura 1 (b), realizando a quebra

de simetria e gerando a função de conversão de polarização (Etapa 2). Ao mesmo tempo, a inserção do *patch* proporcionou um acoplamento mútuo entre ele e a espira interna mais próxima, melhorando o casamento de impedância, e consequentemente aumentado a absortividade. Logo, nessa segunda etapa foi obtida uma metasuperfície com absortividade de 84,50% e 96,90% para as frequências de 4,20 GHz e 6,76 GHz, respectivamente, e pico na PCR de 88,32% na frequência de 10,69 GHz. Para inserir a terceira função na estrutura, o plano de terra cheio foi substituído por uma FSS, Figura 1 (a) (Etapa 3), criando assim uma tendência de transmissão na frequência de 4,8 GHz com magnitude de 0,67. Porém, essa alteração no plano de terra fez com que a reflexão ocorresse apenas em algumas frequências, diminuindo os picos de absorção e conversão de polarização, além de gerar um deslocamento nas frequências dessas funções. Assim, nessa terceira etapa, a absortividade ficou em 59,79% e 61,05%, para 3,87 GHz e 6,35 GHz respectivamente, e o pico da PCR de 85,12% em 9,74 GHz. Com objetivo de aumentar a eficiência dessa metasuperfície multifuncional, foi inserido um superestrato, para compensar o descasamento de impedância, além de melhorar a resposta sob incidência angular, chegando assim na estrutura final, Figura 1(c) (Etapa 4), com os resultados de absortividade de 93,77% e 97,99% para as frequências de 3,58 GHz e 5,58 GHz, respectivamente, PCR com pico de 97,39% em 9,82 GHz, e transmissão na frequência de 4,6 GHz.

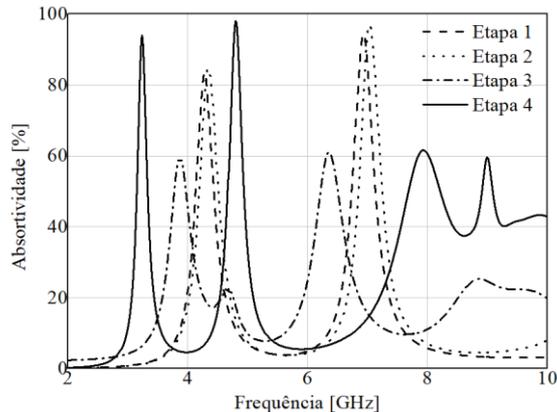


Fig. 10. Evolução da Função de Absorção.

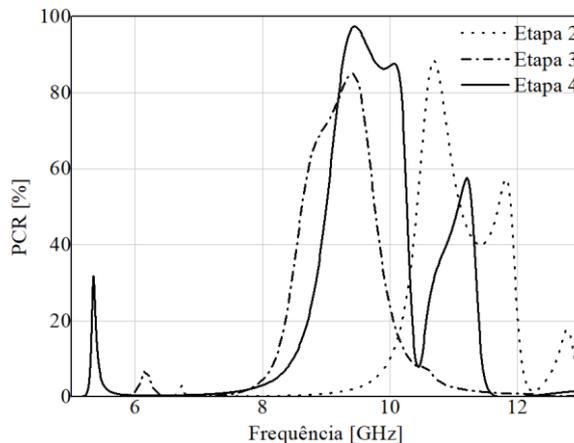


Fig. 11. Evolução da Função de Conversão de Polarização.

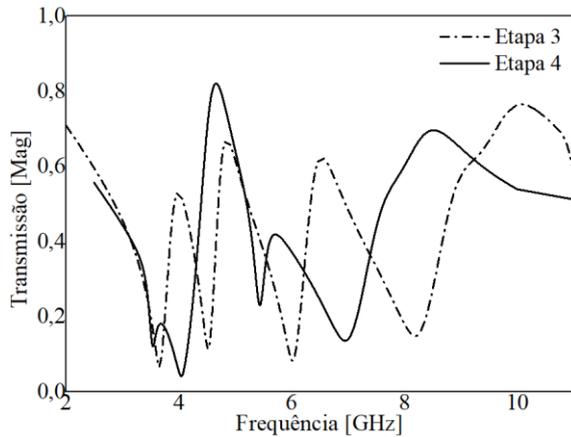


Fig. 12. Evolução da Função de Transmissão.

V. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi proposta uma metassuperfície multifuncional, fina e de camada única que pode alcançar absorção, transmissão e conversão de polarização simultaneamente. Suas multifunções foram obtidas utilizando uma estrutura DMDM com ressonadores simétricos e a substituição de um plano terra cheio por uma FSS. De acordo com os resultados das simulações, o PCR é superior a 90% na faixa de frequência de 9,59 a 10,05 GHz, e o valor do PCR no ponto de ressonância é de 97,39%. A função de absorção possui dois picos de operação em 3,58 GHz e 5,58 GHz, com uma taxa de absorção de 93,77% e 97,99% respectivamente. E por fim a transmissão é realizada na frequência de 4,6 GHz. Devido às características de casamento de impedância, perda ôhmica em baixas frequências e forte ressonância eletromagnética em altas frequências da metassuperfície, a estrutura proposta pode integrar a tripla função de absorção, conversão de polarização e transmissão.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi parcialmente financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), sob o projeto número 210.847/2024.

REFERÊNCIAS

[1] N.Yu and F. Capass, *Nat. Mater.* 13, 139 (2014).
 [2] C.L. Holloway, E.F. Kuester, J. A. Gordon, J. O'Hara, J. Booth, and D.R. Smith, *IEEE Antennas Propag. Mag.* 54, 10 (2012).
 [3] Y. Shi, Z. K. Meng, W. Y. Wei, W. Zheng, and L. Li, "Characteristic Mode Cancellation Method and Its Application for Antenna RCS Reduction," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1784-1788, Sept. 2019.
 [4] S. Celozzi, R. Araneo, P. Burghignoli; G. Lovat, "Frequency Selective Surfaces," in *ElectromagneticShielding: Theory and Applications*, IEEE, 2023, pp.363-408.
 [5] M. Wang, D. Liao, J. Y. Dai and C. H. Chan, « Dual-Polarized Reconfigurable Metasurface for Multifunctional Control of Electromagnetic Waves, » in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 6, pp. 4539-4548, June 2022.
 [6] P.C.Wu, W.Zhu, Z.X. Shen, P.H.J. Chong, W.Ser, and D.P. Tsai, *Adv. Opt. Mater.*5, 1600938 (2017).
 [7] J.P.Balthasar Mueller, N.A. Rubin, R.C.Devlin, B.Groever, and F.Capasso, *Phys. Rev.Let.*118,113901 (2017).

[8] Yu P, BesteiroLV, Huang Y, Wu J, Fu L, Tan HH, et al (2018) Broadband metamaterial absorbers. *Adv Opt Mater* 0(0):1800995. <https://doi.org/10.1002/adom.201800995>.
 [9] V.S. Asadchy, I.A. Faniayeu, Y.Ra'di, S.S.Khakhomov, I.V.Semchenko, and S.A.Tretyakov, *Phys.Rev.X*5,031005 (2015).
 [10] Jing X, Gui X, Zhou P, Hong Z (2018) Physical explanation of Fabry-Pérot cavity for broadband bilayer metamaterials polarization converter. *J Lightwave Technol* 36(12):2322-2327.
 [11] Wu, C., & Yu, T. Metasurface-based polarization control devices: Principles, classifications, and applications. *Nanophotonics*, 8(5), 803–826. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0011> (2019).
 [12] F. D. M. Nobre, M. W. B. Da Silva, A. L. P. De Siqueira Campos and T. N. Ferreira, "Analysis and Design of an Ultra-Wideband Polarization Converter Based on Anisotropic Metasurface," 2023 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), Castelldefels, Spain, 2023, pp. 151-153, doi: 10.1109/IMOC57131.2023.10379767.
 [13] X. Zhang, Z. Wei, Y. Fan, C. Wu, K. Cheng, L. Qi, B. Zhang, and Xia Zhang, "Ultrathin dual-functional metasurface with transmission and absorption characteristics", *Opt. Mater. Express* 8, 875-883 (2018).
 [14] F. G. Meng, H. Li, D. Fan, F. Li, F. Xue, P. Chen, R. Wu, "Transmitting-absorbing material based on resistive metasurface", *AIP Advances* 1 July 2018; 8 (7): 075008. <https://doi.org/10.1063/1.5037772>.
 [15] Z. L. Mei, X. M. Ma, C. Lu, Y. D. Zhao, "High-efficiency and wide-bandwidth linear polarization converter based on double U-shaped metasurface", *AIP Advances* 1 December 2017; 7 (12): 125323. <https://doi.org/10.1063/1.5003446>.
 [16] R. Dutra, D. Miltra and J. Ghosh, "Dual-band multifunctional metasurface for absorption and polarization conversion", *Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng.*, vol. 30, no. 7, 2020.
 [17] J. Wang, R. Yang, R. Ma, J. Tian and W. Zhang, "Reconfigurable multifunctional metasurface for broadband polarization conversion and perfect absorption", *IEEE Digital Object Identifier* 10.1109/ACCESS.2020.3000042.
 [18] R. Dutta, D. Mitra, J. Ghosh, "Dual-band multifunctional metasurface for absorption and polarization conversion", *Int J RF Microw Comput Aided Eng.* 2020; 30:e22200. <https://doi.org/10.1002/mmce.22200>.
 [19] D. R. Smith, "Analytic expression for the constitutive parameters of magnetolectric metamaterials", *Physical Review E*, vol. 81, March 2010.
 [20] S. U. Rahman, W. Yi, and Q. S. Cao, *IEEE Trans. Antennas Propag.* 68, 8272 (2020).
 [21] H. Y. Sun, C. Q. Gu, X. L. Chen, Z. Li, L. L. Liu, and F. Martín, *J. Appl. Phys.* 121, 174902 (2017).
 [22] S. Fang, L. Deng, P. Zhang, L. Qiu, H. Xie, S. Huang, J. Du, Z. Wang; "Dual-function flexible metasurface for absorption and polarization conversion and its application for radar cross section reduction", *J. Appl. Phys.* 7 April 2022; 131 (13): 135106. <https://doi.org/10.1063/5.0074581>
 [23] S. U. Rahman, Q. Cao, I. Gil, M. Sajjad and Y. Wang, "Design of Wideband Beamforming Metasurface With Alternate Absorption," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 21393-21400, Jan 2020.