

# Aprimoramento de Parâmetros de Antena Ressonadora Dielétrica com Cerâmica Reciclada e Alimentação Modificada

Rafael A. Vieira do Vale, Isaac B. T. da Silva e Antonio Luiz P. de S. Campos

**Resumo** - Este artigo propõe o estudo e construção de uma antena ressonadora dielétrica cilíndrica constituída de material cerâmico proveniente do reaproveitamento de telhas e tijolos com baixa permissividade relativa ( $\epsilon_r = 3,65$ ) e baixas perdas dielétricas ( $\tan \delta = 12 \times 10^{-5}$ ) alimentada por estruturas de acoplamento por abertura com a fenda de alimentação inclinada em  $45^\circ$ . Além disso, uma superfície seletiva em frequência (FSS) rejeita-faixa foi adicionada à estrutura da antena. No estudo foram determinados, em simulações com ANSYS HFSS 2025 R2 e em medições com um analisador de redes vetoriais, o parâmetro  $|S_{11}|$ , os ganhos realizados e as relações frente-costas (FBR) da antena com a presença e a ausência da FSS para observação e avaliação das mudanças dos parâmetros analisados.

**Palavras-Chave**— Antenas Ressonadoras Dielétricas, Resíduo Cerâmico, 5G, Sub-6GHz.

**Abstract** – This paper proposes the study and construction of one cylindrical dielectric resonator antenna made of ceramic material derived from the reuse of tiles and bricks, featuring low relative permittivity ( $\epsilon_r = 3.65$ ) and low dielectric losses ( $\tan \delta = 12 \times 10^{-5}$ ), fed by aperture coupling structure with a  $45^\circ$  inclined coupling slot. Additionally, a band-stop frequency selective surface (FSS) was incorporated into the antenna structure. The study determined, through simulations using ANSYS HFSS 2025 R2 and measurements with a vector network analyzer, the  $|S_{11}|$  parameters, realized gains, and front-to-back ratios (FBR) of the antenna with and without the FSS, aiming to observe and evaluate changes in the analyzed parameters.

**Keywords**— Dielectric Resonator Antennas, Ceramic Residue, 5G, Sub-6GHz.

## I. INTRODUÇÃO

O interesse por antenas mais compactas, mais leves e com baixo custo de produção, nos últimos anos, tem aumentado por causa das diversas aplicações de dispositivos portáteis sem fio, como telemetria espacial, coleta de energia em radiofrequência (RFEH), receptores compactos para Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), transmissão de vídeo digital portátil (DVB-H) e sistemas globais para comunicações móveis (GSM) [1] – [3].

Uma tecnologia candidata para essas aplicações modernas é a antena ressonadora dielétrica, (DRA) que vem sendo investigada por reunir características construtivas adequadas para comunicações sem fio aliadas à operação com maior largura de banda e menores perdas quando comparada às antenas de microfita, o que permite a sua aplicação em circuitos integrados de micro-ondas modernos [4] – [7].

Nesse contexto, cerâmicas dielétricas de micro-ondas podem ser usadas como materiais importantes no desenvolvimento de antenas ressoadoras dielétricas e novas opções de cerâmicas têm sido investigadas por pesquisadores para o desenvolvimento de aplicações em novas tecnologias de comunicações, que demandem maiores capacidades de

transmissão e menores latências. Materiais com baixas permissividades e baixas perdas dielétricas podem ser ideais para essas aplicações [8] – [10]. Para oferecer melhorias na taxa de transmissão dos dispositivos de comunicação com baixas perdas de energia as cerâmicas dielétricas de micro-ondas devem ter permissividades relativas inferiores a 15 e tangentes de perdas menores que  $5 \times 10^{-4}$ .

Dessa forma, visando minimizar os problemas citados de custo e características elétricas das cerâmicas usadas em DRAs, em [11], foi proposto o uso de resíduos cerâmicos de tijolos e telhas, para serem usados como matéria prima para o desenvolvimento de pastilhas cerâmicas, para serem usadas como DRA. A coleta dos materiais foi obtida a partir de resíduos cerâmicos gerados durante uma reforma em um prédio da Universidade Federal do Ceará, Campus Russas. O material coletado passou por um processo de limpeza, moagem, peneiramento, compressão e sinterização resultando em pastilhas cerâmicas para serem aplicadas em uma DRA [11].

Assim, este trabalho propõe o uso de uma cerâmica de baixo custo, baixa permissividade elétrica relativa e baixa tangente de perdas, para a implementação de uma DRA, para possível aplicação em sistemas de comunicação móvel de quinta geração (5G), na faixa Sub-6GHz. Além disso, é proposta a integração dessa DRA com uma FSS refletora, buscando a melhoria de alguns parâmetros básicos da DRA como ganho e FBR.

## II. PROJETO DA DRA E DA FSS

### A. Projeto da DRA

Uma antena ressonadora dielétrica cilíndrica (CDRA) foi projetada. Para excitar o modo  $HE_{118}$ , utilizado no cálculo da frequência de ressonância, foi empregado o método de acoplamento por abertura. A vista superior da estrutura básica da CDRA excitada está ilustrada em Fig. 1(a) e a vista lateral em Fig. 1(b).

As dimensões relativas à Fig. 1,  $h_{DRA}$ ,  $r_{DRA}$  e  $h_{sub}$  são respectivamente, 9,13 mm, 11,50 mm e 1,6 mm. O substrato dielétrico utilizado para o projeto da DRA foi o FR-4 ( $\epsilon_{rsub} = 4,4$  e  $\tan \delta = 0,02$ ). A permissividade relativa do cilindro cerâmico ( $\epsilon_{rDRA} = 3,65$ ) e tangente de perdas ( $\tan \delta = 12 \times 10^{-5}$ ), obtida a partir da pesquisa com resíduos cerâmicos de telhas e tijolos sinterizados a  $1100^\circ\text{C}$ , resultante da investigação em [11] também conduzida pelos autores deste trabalho. A frequência de ressonância para o modo  $HE_{118}$  foi de 5,17 GHz determinada conforme [12]. A estrutura de alimentação com inclinação  $\alpha = 45^\circ$  na fenda, mostrada em Fig. 2(a) e 2(b), foi inspirada nas modificações do plano de terra apresentadas em [13], [14]. A frequência de projeto da DRA é [12]:

$$f_{HE_{11\delta}} = \frac{6,324 c}{2\pi a \sqrt{\epsilon_r + 2}} \left[ 0,27 + 0,36 \left( \frac{a}{2h} \right) + 0,02 \left( \frac{a}{2h} \right)^2 \right] \quad (1)$$

em que  $a$  e  $r$  são, respectivamente, o raio e a altura da DRA e  $c$  é a velocidade da luz.

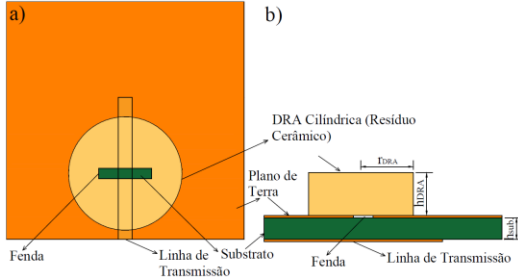


Fig. 1: Estrutura da DRA: vista superior (a) e vista lateral (b).

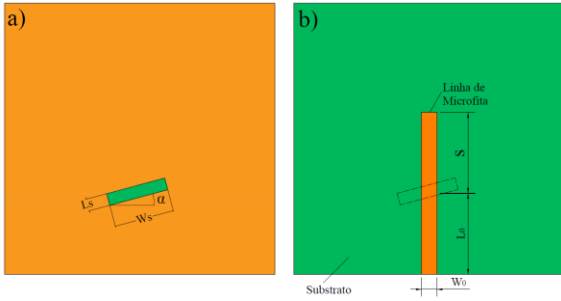


Fig. 2: Esquemas de alimentação: plano de terra com abertura inclinada (a) e sua respectiva linha de microfita (b)

A antena exibiu o respectivo modo ressonante com  $L_0$  e  $S$  em meio comprimento de onda. As dimensões relacionadas ao esquema de alimentação  $L_0$ ,  $W_0$ ,  $S$ ,  $W_s$  e  $L_s$ , em milímetros, calculadas com base na frequência de ressonância de 5,17 GHz, sendo, respectivamente: 29,21 mm; 3,06 mm; 16,00 mm; 2,41 mm; e 11,075 mm.

### B. Projeto da FSS Rejeita-Faixa

Para avaliar melhorias nos parâmetros operacionais da antena, foi projetada uma FSS rejeita-faixa na forma de uma espiral quadrada, como mostrado em Fig. 3, utilizando também o substrato FR-4 na frequência de ressonância calculada para a antena. A dimensão inicial  $D$  foi obtida, de acordo com [6].

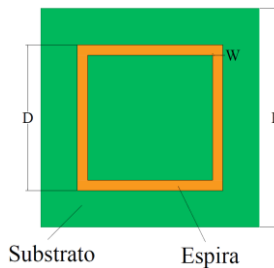


Fig. 3: Célula unitária da FSS rejeita-faixa.

A dimensão  $D$  calculada foi de 9 mm, enquanto para a largura  $W$  a medida deve ser próxima de  $D/10$ , sendo a dimensão adotada de 1 mm, e a periodicidade  $P$  da célula escolhida foi de 20 mm. Além de melhorar os parâmetros, a FSS só refletirá a faixa de frequências de interesse, não afetando as demais faixas, diferente de um refletor contínuo.

### C. Estrutura da CDRA com a FSS

A FSS foi projetada para operar em conjunto com a DRA projetada e será posicionada na parte traseira da antena, próxima à linha de microfita. A estrutura consiste em um arranjo refletor periódico de  $11 \times 10$  células unitárias, totalizando 110 elementos, com dimensões de 220 mm  $\times$  200 mm. A estrutura formada pela DRA integrada à FSS está ilustrada em Fig. 4.

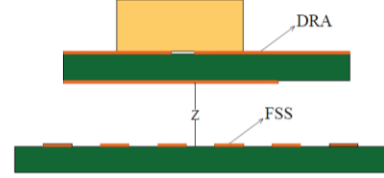


Fig. 4: Esquema do conjunto DRA e FSS Rejeita-Faixa.

Seu objetivo é redirecionar os lóbulos traseiros para a região frontal da antena. A distância  $Z$  entre a DRA e a FSS assumiu quatro valores possíveis: 1,5 cm; 3 cm; 4,5 cm e 6 cm, valores próximos ao comprimento de onda da antena, para avaliar a melhor posição que apresente os maiores aprimoramentos relativamente aos parâmetros de radiação considerados neste artigo. As simulações da FSS consideraram uma excitação por onda plana com incidência normal.

### III. SIMULAÇÕES E MEDIÇÕES

Numa etapa preliminar, foi realizado o ajuste da dimensão  $D$  da célula unitária da FSS. Para isso, foram simuladas diferentes respostas de  $S_{21}$  variando-se  $D$  entre 9 mm e 14 mm, conforme ilustrado em Fig. 5(a). O melhor desempenho foi obtido para  $D = 14$  mm, resultando em  $|S_{21}| = -44,49$  dB na frequência de 5,16 GHz, com uma largura de banda de 1370 MHz (26,5%) escolhido neste estudo. Adicionalmente, Fig. 5(b) mostra que a FSS apresenta uma fase linear, condição necessária para a utilização da FSS como refletor para antenas.

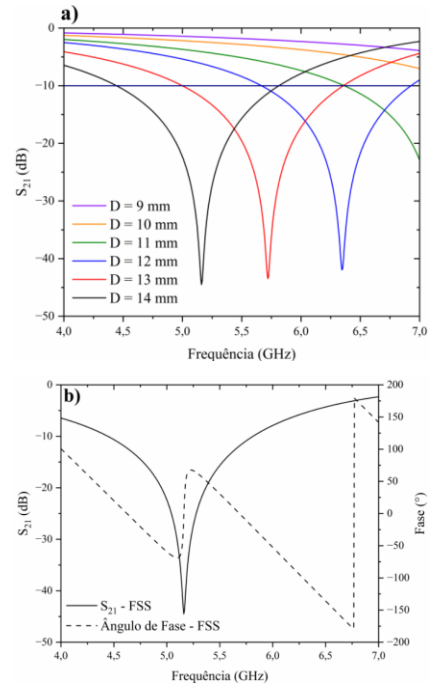


Fig. 5: Curvas de  $S_{21}$  com diferentes valores de  $D$  (a);  $S_{21}$  e ângulo de fase da FSS com  $D = 14$  mm (b).

Para a CDRA com a inclinação na fenda do plano de terra na presença da FSS, os parâmetros de radiação são ilustrados nas Fig. 6(a) a 6(c). O casamento de impedâncias permanece em todas as situações, mas em  $Z = 4,5$  cm e  $Z = 6$  cm apresentaram os melhores valores de  $|S_{11}|$  de  $-35,29$  dB e  $-32,81$  dB, nas respectivas frequências de  $5,2144$  GHz e  $5,2204$  GHz. As larguras de banda para todas as situações com FSS foram um pouco maiores do que na situação sem a FSS, com destaque para  $Z = 1,5$  cm de largura de banda de  $1787,6$  MHz ( $34,36\%$ ). Ainda, em todas as situações, os ganhos foram superiores com maior ganho em  $Z = 3$  cm com  $7,85$  dBi. Para o FBR, nas posições  $Z = 1,5$  cm;  $3$  cm e  $6$  cm o valor foi superior ao da DRA sem a FSS entre  $4$  e  $6$  GHz e para  $Z = 4,5$  cm a respectiva faixa variou de  $4$  a  $5,5$  GHz e nestes intervalos o maior FBR registrado foi em  $Z = 1,5$  cm com  $18,95$  dB.

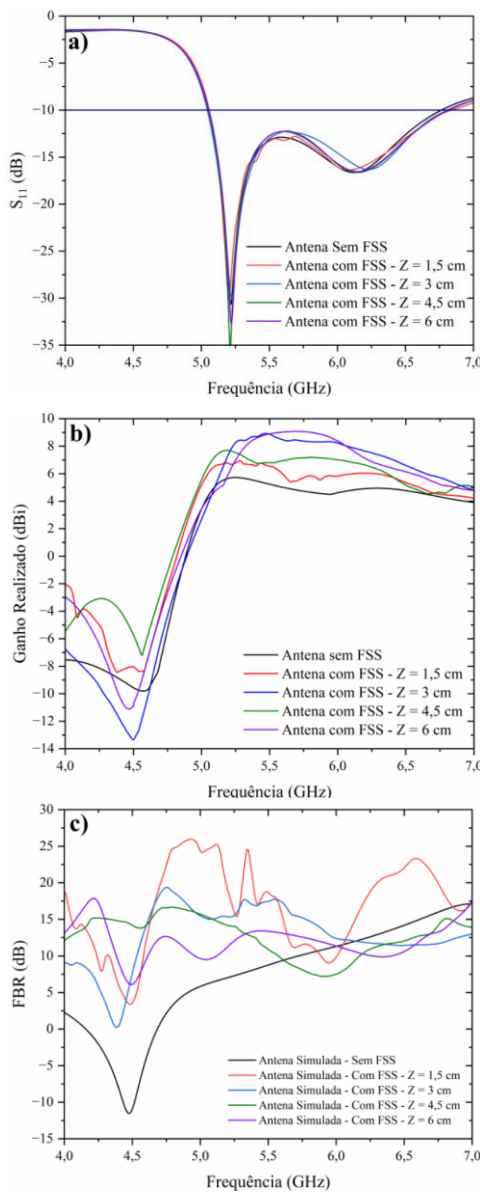
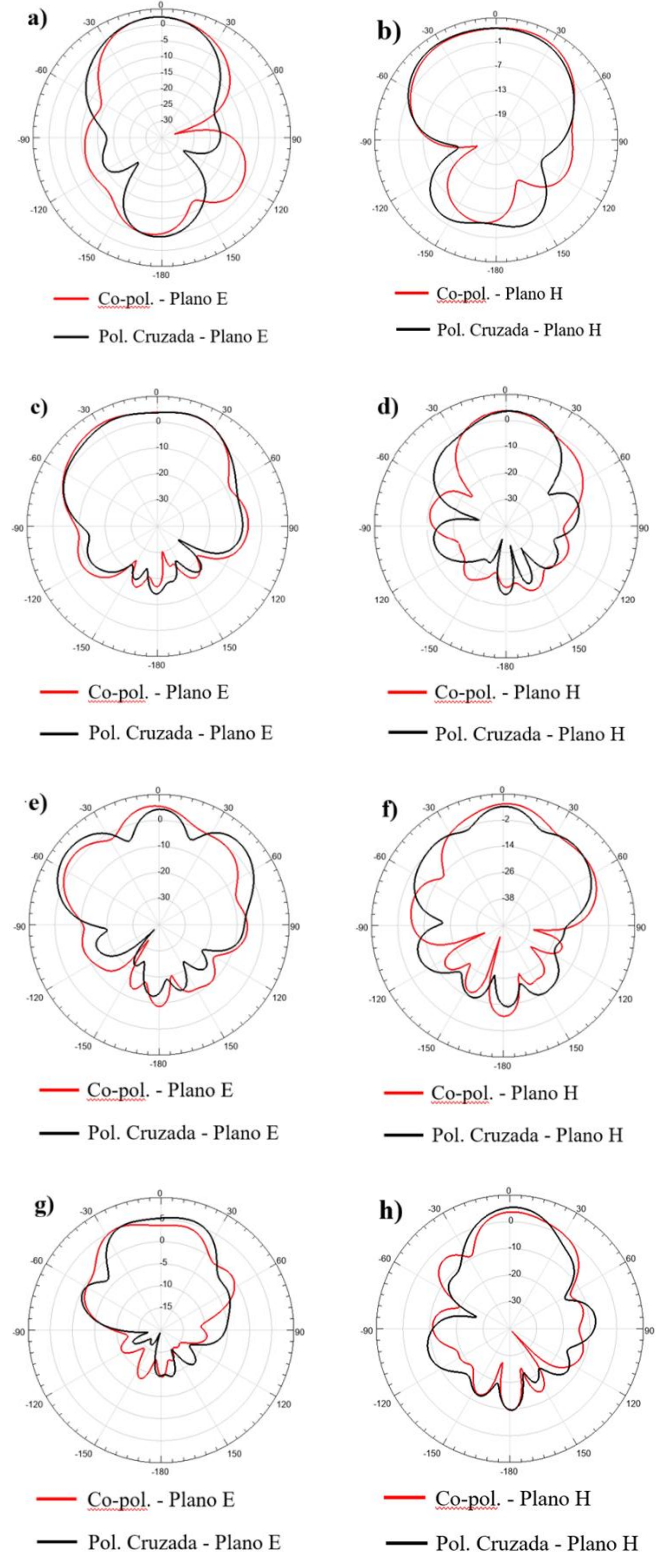


Fig. 6: Resultados simulados da antena com inclinação  $45^\circ$  na abertura de alimentação com a presença da FSS:  $S_{11}$  (a), ganho realizado (b) e FBR (c).

Os diagramas de radiação, Fig. 7(a) a 7(j), mostram que o efeito da FSS como camada refletora permanece evidente em

todas as situações analisadas, tanto no plano E quanto no plano H, bem como nas co-polarizações e nas polarizações cruzadas reduzindo a influência dos lóbulos traseiros apontando parte dessa radiação para o feixe principal. Além disso, em  $Z = 3$  cm e  $Z = 6$  cm as polarizações cruzadas em  $0^\circ$  se mostraram menores em termos de ganho contribuindo para tornar a polarização mais pura.



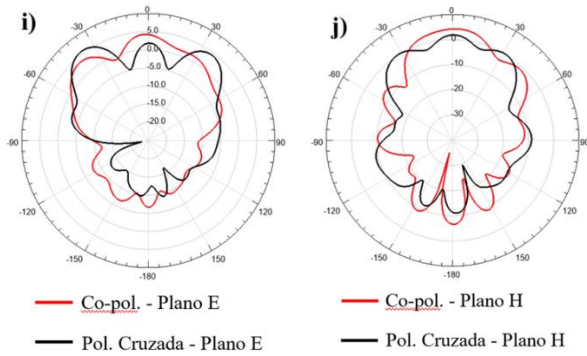


Fig. 7: Diagramas de radiação da CDRA dos planos E e H sem a FSS (a) e (b), em  $Z = 1,5$  cm (c) e (d);  $Z = 3$  cm (e) e (f);  $Z = 4,5$  cm (g) e (h) e  $Z = 6$  cm (i) e (j)

A medição da transmissão através da FSS rejeita-faixa foi realizada com o analisador de redes vetorial Rohde & Schwarz ZND (100 kHz – 8,5 GHz) na faixa de 4 a 7 GHz com 500 pontos, empregando duas antenas Vivaldi como antenas transmissora e receptora, seguindo a configuração de Fig. 8.

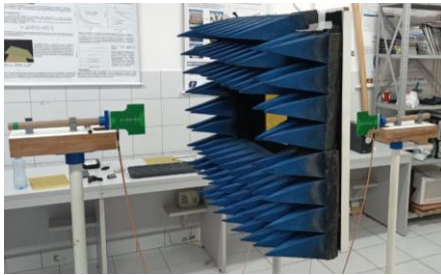


Fig. 8: Setup de medição do  $S_{21}$  da FSS.

As medições do  $|S_{11}|$  foram realizadas com e sem a FSS, conforme Fig. 9(a) e 9(b), por meio de uma sonda coaxial conectada ao VNA Rhode & Schwarz ZND (100 KHz – 8,5 GHz).

Para estimar o ganho realizado e a FBR da antenna em todas as situações estudadas, determinou-se o  $|S_{21}|$  do conjunto de medição da CDRA com uma antenna Vivaldi, conectados ao VNA, conforme a configuração de medição da Fig. 10(a) e 10(b), com e sem a FSS, com a CDRA apontada nas direções frontal e oposta em relação à antenna Vivaldi. A medição de  $|S_{21}|$  para a FSS, conforme mostrado na Fig. 11, apresentou a maior rejeição em 4,7875 GHz, com uma largura de banda de 1792,5 MHz (4,2625 GHz – 6,05 GHz). Mesmo com um deslocamento em frequência da FSS em relação à simulação, a frequência de operação medida da CDRA encontra-se dentro da banda de funcionamento da FSS, permitindo que esta cumpra sua função como superfície refletora.

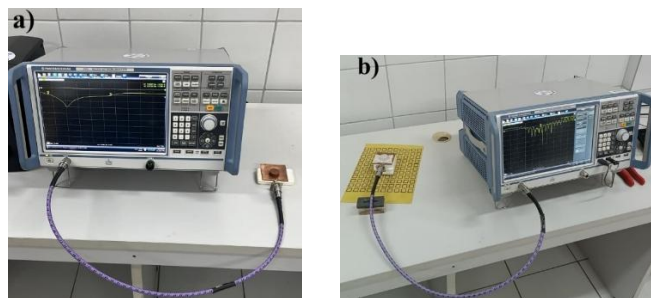


Fig. 9: Setup de medição do  $S_{11}$ : antena sem FSS (a) e antena com FSS (b).



Fig. 10: Aparato de medição do  $S_{21}$  da antenna sem a FSS (a) e com a FSS (b).

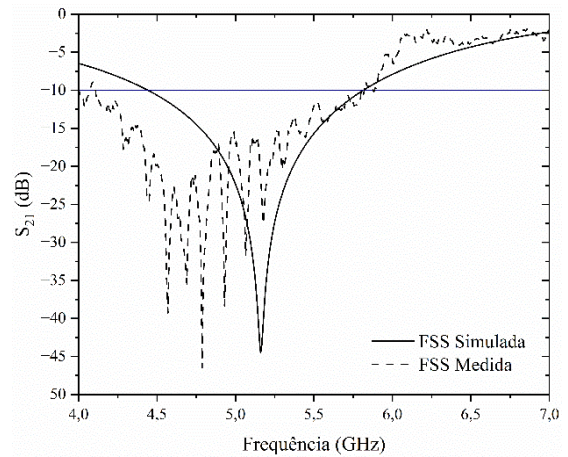


Fig. 11: Resultados medidos e simulados da transmissão da FSS rejeita-faixa.

As medições sem a FSS e com a FSS em todas as posições de  $Z$ , nas Fig. 12(a) a 12(c), apresentaram boa conformidade com os resultados simulados, apesar de as frequências medidas estarem ligeiramente deslocadas em relação à simulação.

Com a presença da FSS os parâmetros, nas Fig. 12(a) a 12(c), mostram boa concordância entre os resultados medidos e simulados, apesar do deslocamento da frequência ainda permanecer. Os resultados mostraram que o melhor casamento de impedâncias ocorre em  $Z = 6$  cm com  $|S_{11}|$  igual a  $-31,53$  dB, mas não supera a perda de retorno da antenna sem a FSS. As larguras de banda foram sempre menores que os resultados simulados, mas a maior banda registrada nas medições ocorre em  $Z = 3$  cm com largura de 640 MHz (11,40%). Em termos de ganho com a presença da FSS os valores foram inferiores aos valores simulados, mas o maior ganho alcançado foi de 6,19 dBi, em  $Z = 6$  cm que também supera o valor do ganho da antenna sem a FSS. As medições mostraram melhorias no FBR, devido à função refletora da FSS rejeita-faixa com destaque para  $Z = 1,5$  cm com FBR igual a 22,11 dB.

As discrepâncias nos dados medidos e simulados, principalmente, os do  $|S_{11}|$  em todas as situações e do ganho realizado nas situações com a FSS podem ser explicadas por possíveis impurezas na composição química e microestrutural da cerâmica, visto que o material foi reutilizado para a constituição do cilindro cerâmico. Outros pontos a serem observados é a porosidade existente na amostra cilíndrica que é evidenciado em [11] bem como pequenos erros advindos da construção dos dispositivos.

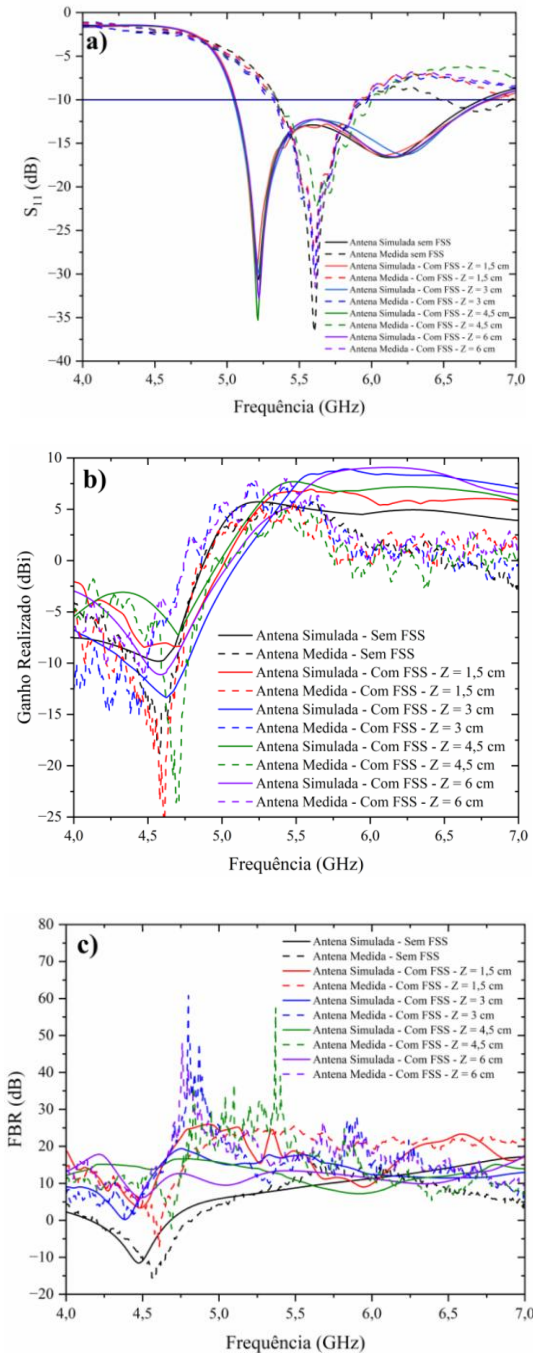


Fig. 12: Resultados medidos e simulados da antena com e sem presença da FSS:  $S_{11}$  (a), ganho realizado (b) e FBR (c).

#### IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o projeto, a fabricação e a caracterização de uma antena ressonadora dielétrica cilíndrica (CDRA) confeccionada com cerâmica reciclada e integrada a uma superfície seletiva em frequência (FSS) rejeita-faixa. Os resultados mostraram que a FSS aprimorou o desempenho da antena, mantendo bom casamento de impedância e aumentando os parâmetros de radiação. Experimentalmente, a configuração com  $Z = 6$  cm apresentou o melhor desempenho global, alcançando  $|S_{11}| = -31,53$  dB e ganho realizado de 6,19 dBi, ambos superiores aos obtidos sem a FSS. A maior relação frente-costas foi de 22,11 dB, obtida para  $Z = 1,5$  cm,

confirmando a eficiência da FSS na redução da radiação traseira. Apesar de pequenos deslocamentos entre simulações e medições, atribuídos às tolerâncias de fabricação e às propriedades da cerâmica reciclada, observou-se boa concordância entre os resultados, demonstrando que a integração da CDRA com a FSS constitui uma alternativa promissora para aplicações em sistemas de comunicações Sub-6 GHz.

#### REFERÊNCIAS

- [1] M. Bodehou, G. Monnoyer, M. Drouguet, K. Al Khalifeh, L. Vandendorpe, and C. Craeye, "Metasurface Antennas for FMCW Radar", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 1040-1044, 2023.
- [2] B. A. F. Esmail and S. Koziel, "Design and Optimization of Metamaterial-Based Dual-Band 28/38 GHz 5G MIMO Antenna with Modified Ground for Isolation and Bandwidth Improvement," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 5, pp. 1069-1073, May 2023.
- [3] M. A. Chung, C. W. Lin, C. C. Hsu and Z. X. Zhang, "Design of a Low-Cost, Compact Dual-Band Monopole Antenna for Internet of Things Equipment," 2025 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM), Hong Kong, 2025, pp. 1 – 3.
- [4] G. P. Paulena, J. M. Vieira, A. H. A. A. Bouari, E. R. Schlosser e M. V. T. Heckler, "Compact Top-Loaded Quarter-Cylinder Dielectric Resonator Antenna", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 24, n° 2, e202592093, abril, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-10742025v24i2292093>.
- [5] M. S. Ibrahim, H. Attia, Q. Cheng e A. Marmoud, "Wideband circularly polarized aperture coupled DRA array with sequential-phase feed a X-band" *Alexandria Engineering Journal*, 2020, 59, 4901-4908. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.09.005>
- [6] S. Mohanty e B. Mohapatra, "Aperture coupled modified rectangular dielectric resonator antenna arrays for X-band applications" *Journal of Mathematical and Computational Science*, 2022, 12:102. DOI: <https://doi.org/10.28919/jmcs/5868>.
- [7] A. S. Al-Zoubi, A. A. Kishk e A. W. Glisson, "Analysis and design of a rectangular dielectric resonator antenna fed by dielectric image line through narrow slots" *Progress in Electromagnetics Research, PIER* 77, 2007, 379-390.
- [8] B. Huang, T. Xia, G. Chen, "A new BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> microwave dielectric ceramic for LTCC application" *Journal of the European Ceramic Society*, 43, 2023, 6107-6111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.07.004>.
- [9] L. Ao, Y. Tang, J. Li, W. Fang, L. Duan, C. Su, Y. Sun, L. Liu, L. Fang, "Structure characterization and microwave dielectric properties of LiGa<sub>5</sub>O<sub>8</sub> ceramic with low- $\epsilon_r$  and low loss" *Journal of the European Ceramic Society*, 40, 2020, 5498-5503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.06.017>.
- [10] H. Oshato, J. Varghese, A. Kan, J. S. Kim, I. Gagoyama, H. Ogawa, M. T. Sebastian e H. Jantunen, "Volume crystallization and microwave dielectric properties of indialite/cordierite glass by TiO<sub>2</sub> addition" *Ceramics International*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.126>.
- [11] R. A. V. Vale, I. B. T. Silva, H. D. Andrade, A. L. P. S. Campos, "Microstructural and dielectric properties of civil construction ceramic waste sintered at various temperatures", *Ceramics International*, 50, pp. 28458 – 28465, 2024.
- [12] P. Chakraborty, A. Karmakar e A. Saha, "A review on dielectric resonator antennas: past and present" *Wireless Personal Communications*, 134, 1367-1388, 2024.
- [13] G. Drossos, Z. Wu e L. E. Davis, "Aperture-coupled cylindrical dielectric resonator antennas forming four-elements linear arrays" *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 20, n° 2, 1999.
- [14] W. J. Yang, Y. M. Pan e S. Y. Zheng, "Design of self-decoupled circularly polarized MIMO dielectric resonator antenna arrays based on polarization orthogonality" *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 72, n° 2, 2024.