

Antena Ressonadora Dielétrica Feita de Amostra Cerâmica Cilíndrica Fabricada a Partir de Resíduos de Telhas e Tijolos

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

Resumo - Este trabalho propõe o projeto de uma antena ressonadora dielétrica cilíndrica a partir de resíduos cerâmicos de tijolos e telhas. A amostra foi confeccionada em formato cilíndrico e sinterizada a uma temperatura de 1100°C. O projeto da DRA seguiu o método de alimentação por acoplamento por abertura. A simulação foi realizada para determinar a perda de retorno, ganho, eficiência de radiação, relação frente-costas, além dos diagramas de radiação de co-polarização e de polarização cruzada. As medições da perda de retorno, eficiência e ganho foram realizadas para comparação com os resultados simulados. A antena proposta visa aplicações em sistemas de quinta geração na banda Sub-6 GHz.

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

Abstract – This study proposes a cylindrical dielectric resonator antenna (CDRA) utilizing ceramic waste from brick and tiles. The sample was fabricated in a cylindrical shape and sintered at 1100°C. The DRA design followed the aperture-coupled feed method. Simulations were conducted to evaluate key performance parameters, including return loss, gain, radiation efficiency, front-to-back ratio, and co- and cross-polarization radiation patterns. The return loss, gain, and efficiency measurement were conducted in comparison with the simulated results. The proposed antenna target applications in fifth generation (5G) communication systems operating in the Sub-6 GHz band.

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

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a pesquisa de novos materiais com propriedades dielétricas relevantes para diversos campos da engenharia tem crescido consideravelmente. O avanço dos sistemas de comunicação móveis e por satélite, utilizando a faixa de micro-ondas, gerou uma demanda crescente por antenas ressonadoras dielétricas (*Dielectric Resonator Antenna* – DRA) [1], [2]. Nesse contexto, vários tipos de materiais cerâmicos têm sido empregados no desenvolvimento de circuitos de alta frequência e de baixo custo de fabricação [1].

Em [3], os autores destacam que as antenas ressonadoras dielétricas emergiram como uma tecnologia importante, oferecendo vantagens em relação às antenas metálicas tradicionais. Em [4], os autores apontam que essas antenas apresentam diversas características desejáveis, como baixo custo, tamanho compacto, menores perdas condutivas, alta eficiência de radiação, ampla largura de banda e compatibilidade com vários mecanismos de alimentação.

Rafael A. V. do Vale e Antonio L. P. de S. Campos, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, UFRN, Natal-RN, e-mail: rafaelengelet@ufc.br e antonio.campos@ufrn.br; Ruann V. A. Lira e Isaac B. T. da Silva, UFRSA, Mossoró-RN, e-mail: ruannvictor@gmail.com e isaac.barros@ufersa.edu.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq, pelo projeto 303191/2021-0.

Além disso, em [5] afirma-se que a operação das DRAs pode ser controlada pela escolha da constante dielétrica adequada do ressonador e suas dimensões. Em [4], se acrescenta que os materiais dielétricos, em geral, sustentam a distribuição do campo elétrico e minimizam a perda de energia na forma de calor. No entanto, sua eficiência depende das perdas dielétricas, expressas pela tangente de perdas ($\tan \delta$): quanto menor essa tangente, maior a eficiência do material, influenciando diretamente a operação das DRAs.

Os autores ressaltam em [6] que, para melhorar as taxas de transmissão de dados e reduzir perdas de energia em sistemas de comunicação, os materiais cerâmicos na faixa de micro-ondas devem apresentar uma constante dielétrica baixa ($\epsilon_r < 15$) e baixas perdas dielétricas ($\tan \delta < 5 \times 10^{-4}$). Contudo, os altos custos de produção representam um grande obstáculo à sua aplicação em comunicações na faixa de micro-ondas.

Em [7], os autores demonstraram que a tangente de perdas influencia o ganho de uma antena, de modo que quanto maiores as perdas dielétricas do material, menor será o ganho operacional. Assim, materiais com elevada tangente de perdas podem comprometer a performance das antenas ressonadoras dielétricas.

Ressalta-se que o uso de cerâmicas dielétricas em micro-ondas pode causar um atraso na transmissão de dados quando operadas em altas frequências e o tempo de atraso na transmissão do sinal está diretamente relacionado ao valor da constante dielétrica [8], [9].

Assim, este trabalho propõe a utilização de amostra cerâmica cilíndrica para aplicações em antena ressonadora dielétrica destinada a sistemas de quinta geração na banda Sub-6 GHz. A amostra foi fabricada a partir de resíduos cerâmicos de telhas e tijolos, frequentemente encontrados em obras de construção e reformas, que normalmente são descartados no meio ambiente. Esses resíduos podem gerar amostras cerâmicas podem apresentar baixas permissividades e baixas perdas dielétricas, tornando-se adequados para as aplicações pretendidas.

II. PROJETO DA ANTENA DIELÉTRICA RESSONADORA

Para este trabalho, o formato cilíndrico foi escolhido devido à forma geométrica do molde de aço utilizado na fabricação dos ressonadores dielétricos. O método de alimentação aplicado foi o método de acoplamento por abertura por causa da sua simplicidade de construção para a excitação do modo $HE_{11\delta}$, modo utilizado para calcular as frequências de ressonância. A estrutura básica da antena ressonadora dielétrica é ilustrada na Fig. 1, em vista superior na Fig. 1(a) e em vista lateral na Fig. 1(b).

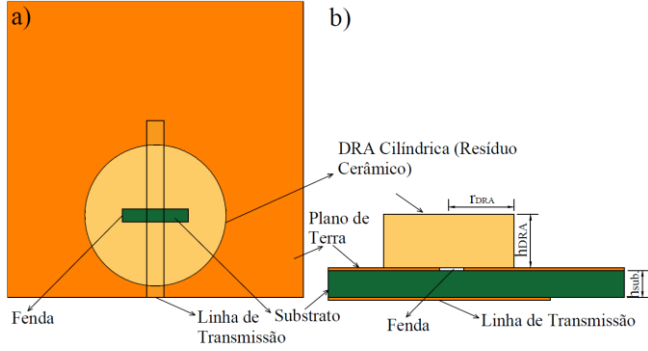


Fig. 1. Estrutura da DRA: vista superior (a) e vista lateral (b).

Na Fig. 1(b), h_{DRA} é a altura do cilindro ressonador, r_{DRA} é o raio do ressonador e h_{sub} é a espessura do substrato da antena DRA. O substrato utilizado no projeto da DRA foi o FR-4 ($\epsilon_r = 4,4$ e $\tan \delta = 0,02$). A frequência de ressonância (f_r) no modo HE_{110} , para a DRA pode ser calculada como [10] – [14]:

$$f_r = \frac{6,324 c}{2\pi r_{DRA} \sqrt{\epsilon_{ref} + 2}} \left[0,27 + 0,36 \left(\frac{r_{DRA}}{2h_{ef}} \right) + 0,02 \left(\frac{r_{DRA}}{2h_{ef}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\epsilon_{ref} = \frac{h_{ef}}{\frac{h_{DRA}}{\epsilon_{rDRA}} + \frac{h_{sub}}{\epsilon_{sub}}} \quad (2)$$

$$h_{ef} = h_{DRA} + h_{sub} \quad (3)$$

em que r_{DRA} é o raio do ressonador cilíndrico, h_{ef} a sua altura efetiva, c a velocidade da luz no vácuo e ϵ_{ref} a permissividade relativa real efetiva da DRA. A permissividade relativa para o ressonador dielétrico cilíndrico, sinterizado a 1100°C , foi coletado a partir das informações determinadas em [15]. Os valores de r_{DRA} , h_{DRA} e da frequência de ressonâncias calculada, de acordo com (1), são apresentados na Tabela I.

TABELA I. PARÂMETROS (EM MM) DE PROJETO DA DRA COM SUBSTRATO DE FR-4.

$T (^\circ\text{C})$	r_{DRA} (mm)	h_{DRA} (mm)	ϵ_{rDRA}	f_r (GHz)
1100	11,505	9,13	3,65	5,1351

Com as frequências de ressonâncias estimadas, foi possível determinar as dimensões da estrutura de alimentação de acoplamento por abertura. A estrutura de alimentação e suas dimensões físicas é mostrada em Fig. 2(a) e 2(b).

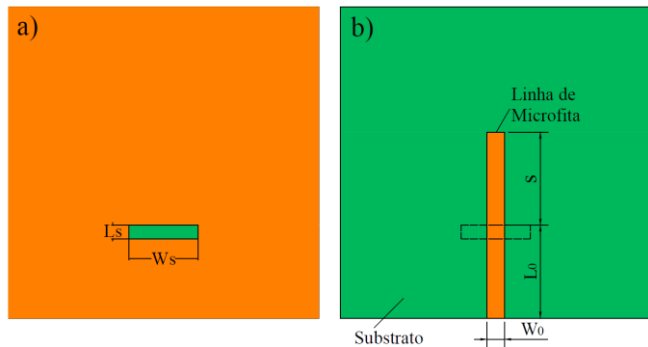


Fig. 2. Esquema de alimentação: (a) plano de terra com abertura e (b) linha de microfita.

Em que L_0 é o comprimento da linha de microfita, W_0 a largura da linha de alimentação, s é o ‘stub’ componente reativo utilizado para cancelar a componente reativa da abertura, W_s a largura da abertura e L_s o comprimento da abertura.

A largura da linha de microfita é calculada pelas equações listadas em [16]. Neste estudo as antenas ressonadoras dielétricas apresentaram seus modos ressonantes nas simulações, com a linha com comprimento da linha de microfita e do ‘stub’ em meio comprimento de onda de acordo com:

$$L_0 = \frac{\lambda_0}{2} = \frac{c}{2f_r} \quad (4)$$

$$s = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref-substrato}}} \quad (5)$$

em que λ_0 é a o comprimento de onda no vácuo, λ_g o comprimento de onda guiado e $\epsilon_{ref-substrato}$ a permissividade relativa efetiva relativo ao substrato utilizado no projeto da antena que pode ser calculado de acordo com as equações de síntese expressos em [16].

Com as frequências de ressonâncias calculadas, as dimensões da abertura de alimentação W_s e L_s foram determinadas como [17], mas ϵ_{ref} usado é o da equação (2):

$$W_s = \frac{0,4\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (6)$$

$$L_s = 0,2 W_s \quad (7)$$

Assim, foram determinadas as dimensões da DRA para o substrato de FR-4. As dimensões em milímetros são apresentadas na Tabela II.

TABELA II. DIMENSÕES (EM MM) DO PROJETO DA DRA COM SUBSTRATO DE FR-4 COM RESSOADOR SINTERIZADO A 1100°C .

$T (^\circ\text{C})$	L_0 (mm)	W_0 (mm)	s (mm)	L_s (mm)	W_s (mm)
1100	29,21	3,06	16,00	2,41	12,075

III. SIMULAÇÕES

Foi projetada uma antena ressonadora dielétrica cilíndrica com as dimensões indicadas na Tabela II com ressoadores cilíndricos sinterizados a 1100°C . Porém, para avaliar melhorias da perda de retorno também foram simuladas antenas para ajuste de W_s variando de 11,075 mm a 13,075 mm com passo de 0,5 mm e os resultados obtidos são mostrados em Fig. 3.

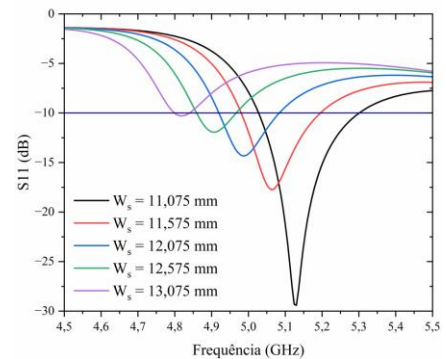


Fig. 3. Resultados dos $|S_{11}|$ para diferentes valores de W_s .

Com as curvas de perda de retorno para diferentes W_s , para a simulação da DRA, foi selecionado o valor de $W_s = 11,075$ mm, mantendo as demais dimensões da Tabela II para o projeto.

Foram simulados os resultados da perda de retorno, do ganho, da eficiência de radiação e da relação frente-costas (FBR), em função da frequência. Pode-se ver na Fig. 4(a), que para a antenna simulada o S_{11} atingido foi de $-29,41$ dB na frequência de ressonância de 5,1303 GHz, próximo à frequência calculada alcançando uma largura de banda de 270,5 MHz em termos percentuais de 5,28% mostrando operação em banda estreita. Na Fig. 4(b) pode-se ver que o ganho alcançado na frequência de ressonância foi de 6,01 dBi, ficando acima de 4 dBi em toda faixa de operação. A Fig. 4(c) mostra a eficiência de radiação simulada da antenna proposta. Na frequência de ressonância a eficiência máxima foi de 88,15%, ficando acima de 60% em toda faixa de operação. A Fig. 4(d) ilustra a relação frente-costas (*front-to-back ratio* – FBR), a FBR foi de 14,28 dB, ficando acima de 8,5 dB em toda faixa de operação. Os resultados dos parâmetros obtidos, na frequência de ressonância, estão listados na Tabela III.

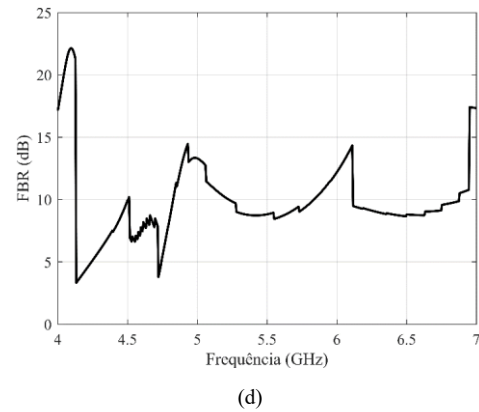
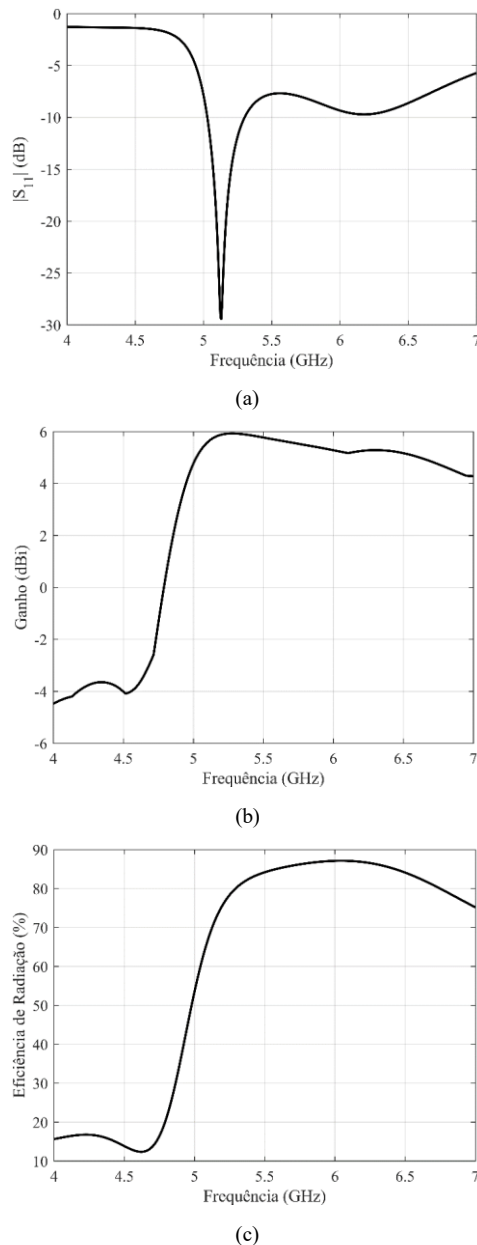


Fig. 4. Resultados das simulações para: (a) Perda de retorno, (b) ganho, (c) eficiência de radiação e (d) relação frente-costas.

TABELA III. RESUMO DOS VALORES DOS PARÂMETROS OBTIDOS COM AS SIMULAÇÕES DAS DRAS.

Parâmetro	Resultado
f_r (GHz)	5,1303
S_{11} (dB)	-29,41
BW (MHz)	270,5
Ganho (dBi)	6,01
Eficiência _{max} (%)	88,15
FBR (dB)	14,28

Os diagramas de radiação simulados dos planos E e H, para a DRA são ilustrados em Fig. 5(a) e 5(b). Pode-se ver que a antenna proposta apresenta pureza de polarização.

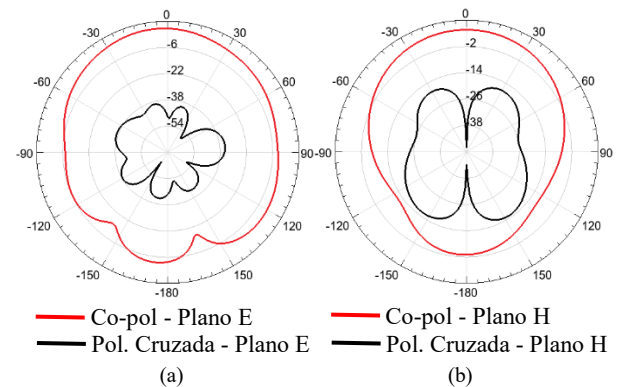


Fig. 5. Diagramas de radiação dos planos E e H da DRA, co-polarizado e polarização cruzada: no (a) plano E e (b) no plano H

IV. MEDIÇÕES

A DRA proposta foi construída de acordo com as dimensões da tabela II e foi medida a perda de retorno para comparativo do seu comportamento com o resultado simulado. O *setup* de medição seguiu por uma sonda coaxial acoplado a um analisador de redes vetoriais Rohde & Schwarz ZND (100 kHz – 8,5 GHz), como mostrado na Fig. 6, na faixa de frequência de 5 GHz a 6 GHz com o número de 500 pontos.



Fig. 6. Setup de medição da perda de retorno da DRA

Com a medição pode ser aplicado o comparativo das perdas de retorno entre a simulação e a medição da DRA como mostrado na Fig. 7. É possível observar que para a medição o S_{11} alcançado foi de $-24,6$ dB na frequência de ressonância de $5,43$ GHz o que mostra um deslocamento da frequência de ressonância com relação a frequência calculada.

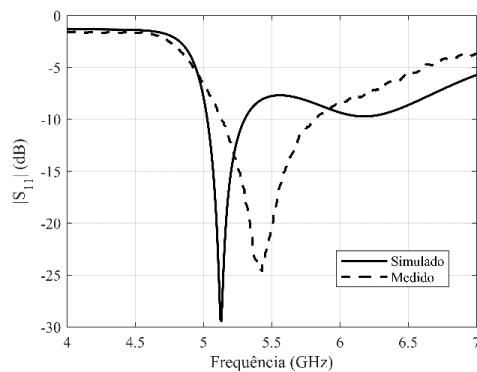


Fig. 7. Comparativo das perdas de retorno medida e simulada para a DRA proposta.

Para medir a eficiência da antena foi usando o método Wheeler cap, com uma blindagem metálica construídas em chapa de alumínio, com 100 mm de raio e 150 mm de altura, de dimensões físicas. Fig. 8 ilustra o setup de medição que utilizou o cap cilíndrico e um analisador de rede vetorial Rhode & Schwarz, modelo ZND (100 kHz - $8,5$ GHz), a varredura foi realizada de 4 GHz a 7 GHz. Pode-se ver na Fig. 9, uma boa aproximação entre os resultados simulados e medidos para a eficiência. Para os valores simulados, a eficiência máxima foi de $88,15\%$ e para os valores medidos foi de $90,24\%$.



Fig. 8. Setup para medição da eficiência.

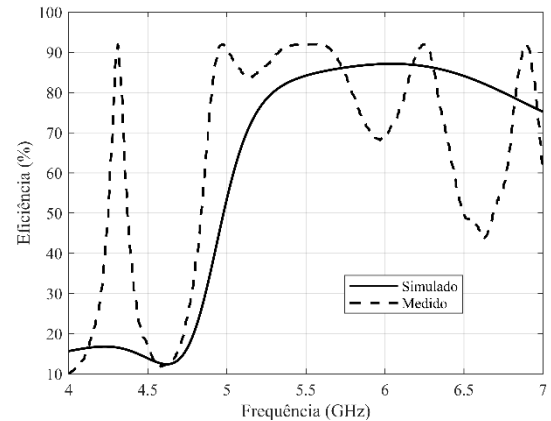


Fig. 9. Comparativo das eficiências medida e simulada para a DRA proposta.

A Fig. 10 apresenta o setup para medição de ganho. As antenas ficaram separadas por uma distância de $91,5$ cm. O ganho foi medido na faixa de 4 GHz a 7 GHz.



Fig. 10. Setup para medição do ganho.

A Fig. 11 ilustra a comparação entre os ganhos simulados e medidos, mostrando boa concordância. Em $5,13$ GHz, o ganho da antena simulada foi de $6,01$ dBi, enquanto o ganho medido foi $6,05$ dBi.

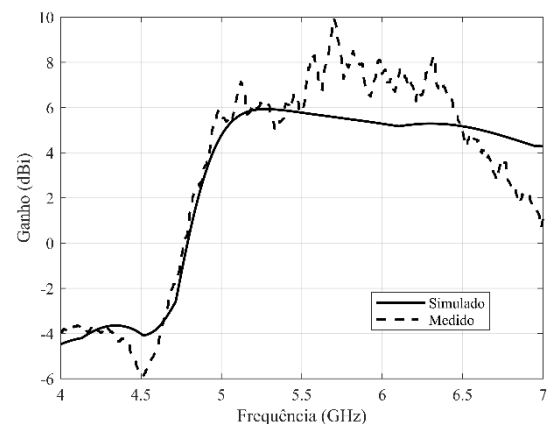


Fig. 11. Comparativo do ganho medido e simulado para a DRA proposta.

O resultado da medição do S_{11} mostra também uma largura de banda superior a largura de banda mostrada na simulação alcançando uma faixa de 680 MHz e largura de banda percentual de $12,52\%$. Apesar do deslocamento de frequência

entre os resultados, a faixa de operação não foram muito distantes com deslocamento inferior a 250 MHz o que denota boa operação da antena. As informações comparativas são apresentadas na Tabela IV.

TABELA IV. INFORMAÇÕES COMPARATIVAS ENTRE RESULTADOS SIMULADOS E MEDIDOS.

Parâmetro	Resultado Simulado	Resultado Medido
f_r (GHz)	5,13	5,43
S_{11} (dB)	- 29,41	- 24,60
BW (MHz)	270,50	680,00
Ganho (dBi)	6,01	6,05
Eficiência máxima (%)	88,15	90,24

A antena medida apresentou algumas diferenças com relação às simulações. Isso fica mais evidente nos comparativos do $|S_{11}|$ e das eficiências de radiação, que podem ser explicadas devido a não-uniformidade do cilindro cerâmico, devido à presença de espaços vazios ainda existentes mesmo após o processo de compressão e de sinterização da amostra cilíndrica. Outra razão é a presença de possíveis impurezas na composição química da cerâmica. Estes motivos podem provocar discrepâncias em diferentes regiões da amostra no que diz respeito aos valores da permissividade relativa e da tangente de perdas do material o que pode alterar os resultados da medição com relação à simulação. Apesar disso os resultados simulados e medidos apresentaram boa correspondência dentro da faixa de operação em Sub-6 GHz.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi proposta uma antena ressonadora dielétrica cilíndrica com alimentação por abertura e linha de microfita. A simulação realizada com o substrato FR-4 indicou que a frequência de ressonância obtida apresentou um pequeno deslocamento com relação a frequência teórica. A perda de retorno ficou abaixo de - 10 dB, com largura de banda em torno de 270 MHz. Em termos de ganho, a antena alcançou valor próximo a 6,0 dBi. A eficiência máxima de radiação registrada foi de 88,15%, já a relação frente-costas alcançou 14,28 dB, e os diagramas de radiação de co-polarização e polarização cruzada dos planos E e H, mostraram lóbulos principais e traseiros bem definidos. Em termos de medição a antena construída apresentou uma pequena divergência na frequência de ressonância entre o resultado simulado e medido, com largura de banda maior e boa concordância de eficiência de radiação e ganho. Apesar destas características, as frequências de operação, simulada e medida, ficaram próximas o que possibilita a aplicação da DRA cilíndrica, constituída de resíduos cerâmicos de telhas e tijolos para sistemas 5G na banda Sub-6 GHz.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pelo apoio parcial à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] A. J. N. de Castro, Investigação a Estabilidade Térmica dos Compósitos da Matriz $[Ba_2CoNbO_6(BCNO)_{1-x}CaTiO_3(CTO)_x]$ operando em altas frequências (Banda C). Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, UFC, Fortaleza-CE, 2020. Acesso em: 26 de Jun. de 2023.
- [2] M. T. Sebastian, Dielectric Materials for Wireless Communications: Chapter 2 – Measurement of Microwave Dielectric Properties and Factors Affecting Them, Editora Elsevier, 2008.
- [3] H. Zhang, Y. H. Joo, Y. Wang, T. Yi, T. H. Sung, “Innovative synthesis technique for high-performance dielectric resonator antennas: laser-induced shockwave sintering of potassium sodium niobate (KNN)”, Nanotechnology, 35, 275601.
- [4] M. F. M. Omar, I. A. Zubir, S. Kamal, J. A. L. Rajendran, J. J. Mohamed, Z. A. Ahmad, M. F. Ain, S. Kamal A. Rahim, “A critical review on the development of multi-geometrical stacked wideband dielectric resonator antenna”, Alexandria Engineering Journal, 100, 111-141, 2024.
- [5] K. Allabouche, F. Ferrero, H. Bernadac, J. M. Ribero, L. Lizzi, N. E. A. El Idrissi, M. Jorio, G. De Calan, J. Sourice, “A cutting-edge broadband Camembert-inspired dielectric resonator antenna”, Results Engineering, 23, 102415, 2024.
- [6] H. Deng, X. Qu, Y. He, X. Wei, Y. Wu, X. Chen, H. Zhou, “Sintering process, phase composition, and microwave dielectric properties of $NaLn(WO_4)_2$ ($Ln = La, Nd, Sm$) ceramics prepared by reaction sintering method”, Journal of Electroceramics, 51, 59-70, 2023.
- [7] P. Pattaswamy, P. S. K. Murthy, B. A. Thomas, “Analysis of loss tangent effect on Microstrip antenna gain”, Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research, Vol. 3, 1102-1107, 2014.
- [8] Y. He, X. Wei, Y. Wu, X. Chen, J. Yang, H. Zhou, “Effects of packing fraction, lattice vibration, and bond valence on the microwave dielectric properties of low- ϵ_r garnet-type $Ca_3Sc_2Ge_3O_{12}$ ceramics”, Journal of Solid State Chemistry, 322, 123980, 2023.
- [9] H. Oshato, J. Varghese, A. Kan, J. S. Kim, I. Gagoyama, H. Ogawa, M. T. Sebastian, H. Jantunen, “Volume crystallization and microwave dielectric properties of indialite/ cordierite glass by TiO_2 addition”, Ceramics International, 47, 2735-2742, 2021.
- [10] R. F. Abreu; S. O. Saturno, D. da M. Colares, F. R. Silva, F. A. C. Nobrega, F. E. A. Nogueira, J. P. C. do Nascimento, S. J. T. Vasconcelos, F. F. do Carmo, T. O. Abreu, A. Ghosh, J. C. Sales, R. S. Silva, A. J. M. Sales, M. A. S. Silva, A. S. B. Sombra, “Enhanced microwave dielectric properties of the $Ba_2TiSi_2O_8$ ceramic by addition of TiO_2 ”, Journal of Electronic Material, 2023.
- [11] A. V. Chaves; M. A. S. da Silva, D. V. M. Paiva, S. E. Mazzetto, A. S. B. Sombra, A. S. de Menezes, P. B. A. Fechine, “Electroceramic based on $Ca_{3-x}Ba_xZrSi_2O_9$ solid solutions for microwave and radiofrequency application”, Ceramics International, 49, 2023 30827-30836.
- [12] A. Iqbal, A. Bouazizi, S. Kundu, I. Elfergani e J. Rodrigues; “Dielectric Resonator Antenna Top Loaded Parasitic Strip Elements for Dual-Band Operation” Microwave Optical Technology Letters, 2019, 61: 2134-2140.
- [13] A. P. Costa, G. Fontgalland, A. Gomes Neto e A. S. B. Sombra; “YIG Matrix Based Multiband Magneto-Dielectric Cylindrical Resonator Antenna” Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetics Applications, Vol 20, nº2, 2021.
- [14] P. Chakraborty, A. Karmakar e A. Saha; “A Review on Dielectric Resonator Antennas: Past and Present” Wireless Personal Communications, 2024, 134:1367-1388.
- [15] R. A. V. do Vale; I. B. T. da Silva; H. D. de Andrade; A. L. P. S. Campos, “Microstructural and dielectric properties of civil construction ceramic waste sintered at various temperatures”, Ceramics International, 2024.
- [16] E. O. Hammerstad, “Equations for Microstrip Circuit Design”, IEEE, 5th European Microwave Conference, 1975.
- [17] S. Ballav; S. K. Parui, “Aperture coupled dielectric resonator antenna embedded in a secondary substrate for mechanical firmness”, Radioengineering, Vol. 27, nº 03, 2018.