

Sistema Multifásico de Bismuto e Cobalto: Síntese e Aplicação como Substrato em Antena de Microfita

Alyson Leite Marreiro de Araújo^[1], Isaac Barros Tavares da Silva^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; alyson.araujo@alunos.ufersa.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; isaac.barros@ufersa.edu.br

RESUMO

No presente estudo, para sintetizar silenita ($\text{Bi}_{13}\text{Co}_{11}\text{Co}_2\text{O}_{40}$), utilizou-se do método sol-gel modificado com quitosana, seguido de calcinação à 750 °C. A amostra resultante foi caracterizada e aplicada como substrato cilíndrico para antenas de microfita de formato retangular e circular. A caracterização estrutural foi realizada por meio de Difractometria por Raios-X (DRX), seguida por refinamento Rietveld, apresentando peso percentual (wt%) de 53,82% para a fase principal. A caracterização dielétrica do material para frequências de 1,0 a 8,5 GHz apresentou valores de permissividade relativa real em torno de 5, e tangente de perdas aproximadamente nula em toda a faixa. Para avaliar o desempenho do substrato, foram projetadas antenas de microfita do tipo circular e retangular para ressonância em frequências próximas de 8,15 GHz. Medições do coeficiente de reflexão ($S_{1,1}$) apresentaram considerável concordância com as simulações, com erros na medida de frequência de ressonância variando de 0,18 a 4,84%, erros na largura de banda entre 0,01 e 0,17 GHz e erro máximo para o parâmetro $S_{1,1}$ de 9,35 dB, reforçando, com isso, a importância das caracterizações e da metodologia para a simulação, síntese e projeto.

Palavras-chave: Antenas de microfita; Substrato dielétrico; Silenita.

ABSTRACT

In order to synthesize sillenite with chemical formula ($\text{Bi}_{13}\text{Co}_{11}\text{Co}_2\text{O}_{40}$), the chitosan-modified sol-gel method was performed, followed by calcination at 750 °C. The resulting sample was characterized and used as cylindrical substrate for circular and rectangular microstrip patch antennas. Structural characterization was performed by X-Ray Diffractometry (XRD), followed by Rietveld refinement, resulting in a weighted percentage (wt%) of 53,82% for the main phase. Dielectrical characterization ranging from 1,0 to 8,5 GHz presented real relative permittivity around 5,0 and dielectric loss tangent approximately zero all over the range. To evaluate the performance of the material as substrate, two different microstrip patch antennas were designed for resonance at 8,15 GHz. Measurements of reflexion coefficient ($S_{1,1}$) presented good agreement with simulations, with errors at resonance frequencies ranging from 0,18 to 4,84%, bandwidth errors ranging from 0,01 to 0,17 GHz and a maximum error of 9,35 dB for the $S_{1,1}$ parameter. The results reinforce the importance of characterizations and of the methods used for simulation, synthesis and design.

Key words: Microstrip patch antennas; Dielectrical substrate; Sillenite.

1 INTRODUÇÃO

Em um mundo permeado por complexos sistemas de telecomunicações, e que demanda constante aprimoramento em eficiência, confiabilidade e portabilidade, o estudo de antenas se mostra fundamental, uma vez que estes dispositivos constituem peça elementar dos circuitos para este tipo de aplicação. Basicamente, as antenas operam como intermediadoras entre espaço livre e dispositivos de guiamento de ondas eletromagnéticas, e, portanto, constituem um elemento crítico no desenvolvimento de sistemas compactos, que sejam, ao mesmo tempo, eficientes [1]. Dispositivos móveis de diversos gêneros, para que atendam a demanda por sistemas cada vez mais interconectados, requerem projetos complexos de antenas, além da pesquisa em torno de novos materiais, suas propriedades mecânicas e seu comportamento eletromagnético. A questão da portabilidade constitui, também, elemento importante a ser considerado; a necessidade de compactação em satélites e sistemas móveis é evidente [2]. Nesse contexto, destacam-se as propriedades de compósitos cerâmicos.

O desenvolvimento de compósitos cerâmicos para aplicações em transmissão sem fio tem sido objeto de estudo e discussões em institutos de tecnologia, universidades e empresas [3]. A crescente demanda por soluções de baixo consumo de energia, mínimas dimensões e custos reduzidos neste ramo têm despertado a atenção de pesquisadores para compósitos cerâmicos, justamente pela ampla gama de propriedades possíveis de se alcançar em função da alta variedade de composições e processos de síntese [3]. Em geral, materiais cerâmicos apresentam altas constantes dielétricas, e baixas perdas por condução na faixa de radiofrequência (RF) e micro-ondas, o que atrai a atenção do setor de telecomunicações. Como um exemplo de aplicação, pode-se citar a utilização destes materiais como substrato para antenas de microfita (em inglês, *microstrip patch antennas*), ou antenas planares.

Antenas de microfita vêm sendo amplamente investigadas devido à simplicidade do processo de fabricação, versatilidade quanto a superfícies, e pequenas dimensões [4,5], qualidades estas indispensáveis para aplicações em celulares, sistemas Wi-Fi, GPS e comunicação via satélite [6-9]. Para que se alcance estas qualidades, no entanto, é necessária a utilização de substratos com propriedades adequadas, com altos valores de constantes dielétricas e baixas perdas [10,11]. O alcance dessas propriedades por meio da síntese desses materiais requer experiência acerca das combinações de compostos químicos, rotas de síntese, morfologia e propriedades eletromagnéticas desejáveis.

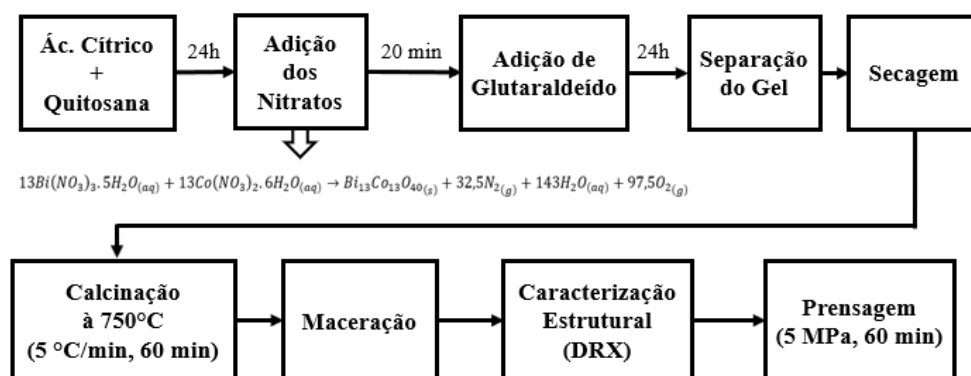
Diversos materiais podem ser utilizados como substrato. Um exemplo bem explorado em [12] é o de compósitos baseados em ferritas. A utilização de ferritas como substrato de antenas de *patch* é promissora devido as suas propriedades eletromagnéticas e rotas de síntese bem conhecidas [13-16]. Um outro material que pode ser destacado são as silenitas, também adequadas a essa aplicação [13]. Recentemente, nanocompósitos de cobaltita-silenita de fórmula $(\text{Bi}_{13}\text{Co}_{11})\text{Co}_2\text{O}_{40}-\text{Co}_3\text{O}_4$ foram sintetizadas e amplamente caracterizadas [17]. As sínteses foram realizadas por meio do método sol-gel e pelo método da combustão. Em [13], foi investigado o comportamento desse material em aplicações na faixa de microondas. As propriedades eletromagnéticas desse material mostraram-se promissoras, e, portanto, é importante que se investigue mais a respeito. A fim de complementar a pesquisa neste campo, portanto, um material baseado em silenita de cobalto foi sintetizado, caracterizado, e o seu comportamento como substrato para antenas de microfita com duas geometrias diferentes foi investigado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Síntese da Silenita

O fluxograma da Figura 1 mostra os principais passos desde a síntese do material até a prensagem para obtenção da forma final. Para a síntetização da silenita, $(\text{Bi}_{13}\text{Co}_{11})\text{Co}_2\text{O}_{40}$, foi utilizado o método sol-gel modificado com quitosana. Primeiramente, preparou-se uma solução ácida de quitosana, utilizando-se ácido cítrico anidro $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (99,8%, Êxodo). A solução foi misturada por 24 h até atingir textura homogênea e gelatinosa. Em seguida, nitrato de cobalto $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (98%, Dinâmica), e nitrato de bismuto $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (98%, Neon) foram adicionados à solução e misturados durante 20 min sob aquecimento. Uma vez dissolvidos os reagentes, glutaraldeído foi adicionado e a amostra não foi mais agitada. Após 24 h, ocorreu a formação de uma mistura heterogênea composta por um gel e um líquido. O gel foi separado do líquido e aquecido até secar completamente. O material resultante foi macerado, calcinado a 750 °C com rampa de 5 °C/min, permanecendo em 750 °C por 60 min, e resfriado naturalmente. O produto final foi macerado novamente, até a obtenção de um pó, que seguiu para caracterização estrutural. Após a caracterização estrutural, com o auxílio de prensa hidráulica e matriz cilíndrica, aproximadamente 1 g do material obtido foi submetido a prensagem à 5 MPa durante aproximadamente 1 h. Por fim, a amostra foi submetida a um processo de sinterização à 750 °C por 4 h. A Tabela 1 especifica as quantidades dos reagentes utilizados, bem como as medidas do cilindro produzido.

Figura 1 – Fluxograma do processo de síntese da silenita.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Tabela 1 – Quantidades utilizadas dos reagentes, e medidas do material compactado.

Reagentes	Quantidade/100 mL H ₂ O
$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$	5 g
$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1 mol
$\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1 mol
Glutaraldeído	14 mL
Dimensões do Substrato Produzido	(mm)
Diâmetro	15,12
Espessura	2,18

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Uma vez sinterizado, o material prosseguiu para caracterizações estruturais e dielétricas, fundamentais para a análise da aplicabilidade do material, e para um melhor entendimento acerca da influência da rota de síntese e das variáveis a ela relacionadas.

2.2 Caracterizações Estrutural e Dielétrica

A estrutura cristalina do material antes da prensagem (em forma de pó) foi caracterizada por meio de DRX em um difratômetro *Rigaku Miniflex-II*, com radiação Cu ($\lambda_{Cu} = 1,5402 \text{ \AA}$). Os dados foram registrados entre 15° e 80° , à $3^\circ/\text{min}$, com passo de $0,02^\circ$. A caracterização dielétrica foi realizada utilizando-se o equipamento *Vector Network Analyzer (VNA) Rohde & Schwarz ZND 100* kHz - 8,5 GHz, juntamente com o kit de medição de permissividade DAK-3-5 (200 MHz – 20 GHz) em uma faixa de 1,0 GHz a 8,5 GHz. Com base em [13], foram estimados valores para a permeabilidade magnética e tangente de perdas, visando aumentar a fidelidade das simulações às medições realizadas.

2.3 Projeto das Antenas

Foram projetados dois formatos de antena planar: circular e retangular. A antena circular foi projetada pelo método das cavidades ressonantes, como mostrado em [13,18,19]. As Equações 1–3 foram utilizadas para obtenção das medidas da antena, onde ϵ_e é a permissividade efetiva do substrato, t é a espessura do substrato, ϵ_r é a permissividade relativa do material utilizado, W_{0c} é a largura da linha de transmissão, e $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Os parâmetros a_e , a e χ_{mn} são, respectivamente, o raio elétrico da antena, o raio real da antena e o m -ésimo zero da derivadas da função de Bessel de ordem n .

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12t}{W_{0c}}\right)^{-1/2} \quad (1)$$

$$a_e = c \frac{\chi_{mn}}{2\pi f_r \sqrt{\epsilon_e}} \quad (2)$$

$$a_e = a \left\{1 + \frac{2t}{a\pi\epsilon_e} \left[\ln\left(\frac{a\pi}{2t}\right) + 1,7726\right]\right\}^{1/2} \quad (3)$$

O *patch* no formato retangular, por sua vez, foi projetado de acordo com o método da linha de transmissão, conforme Equações 4-6, onde L_r e W_r representam o comprimento e a largura do *patch*, respectivamente.

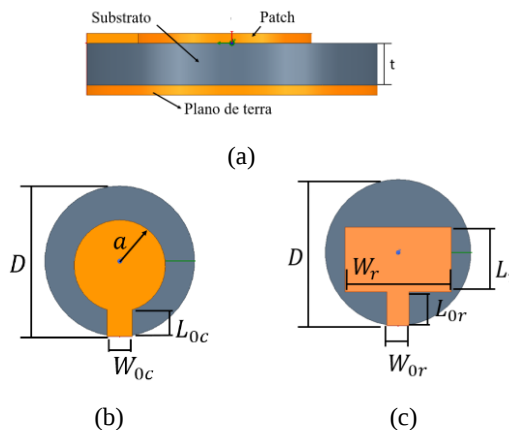
$$W_r = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (4)$$

$$\Delta L = 0,412 \times t \times \frac{(\epsilon_{ref} + 0,3) \times (\frac{W_r}{t} + 0,264)}{(\epsilon_{ref} - 0,258) \times (\frac{W_r}{t} + 0,8)} \quad (5)$$

$$L_r = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{ref}}} - 2\Delta L \quad (6)$$

A Figura 2 ilustra a vista superior e lateral de ambas as geometrias com as principais dimensões indicadas.

Figura 2 – Esquema ilustrativo das antenas projetadas. (a) Vista lateral; (b) Vista superior *patch* circular; (c) Vista superior *patch* retangular.



Variações não uniformes ao longo da rampa de temperatura durante o processo de calcinação podem ter sido responsáveis pelo aparecimento de diferentes fases contendo bismuto, uma vez que singelos desvios podem influenciar na cinética das reações envolvidas. Na Tabela 4, são mostrados os fatores de concordância obtidos pelo refinamento Rietveld, para que fosse possível avaliar o grau de fidelidade dos padrões medidos às cartas utilizadas. R_p , wR_p e χ^2 representam, respectivamente, o resíduo de perfil, o resíduo de perfil ponderado, e o χ -quadrado calculados.

Tabela 4 – Fatores de concordância fornecidos pelo refinamento Rietveld.

	R_p	wR_p	χ^2
Resultado	3,33	4,14	3,27

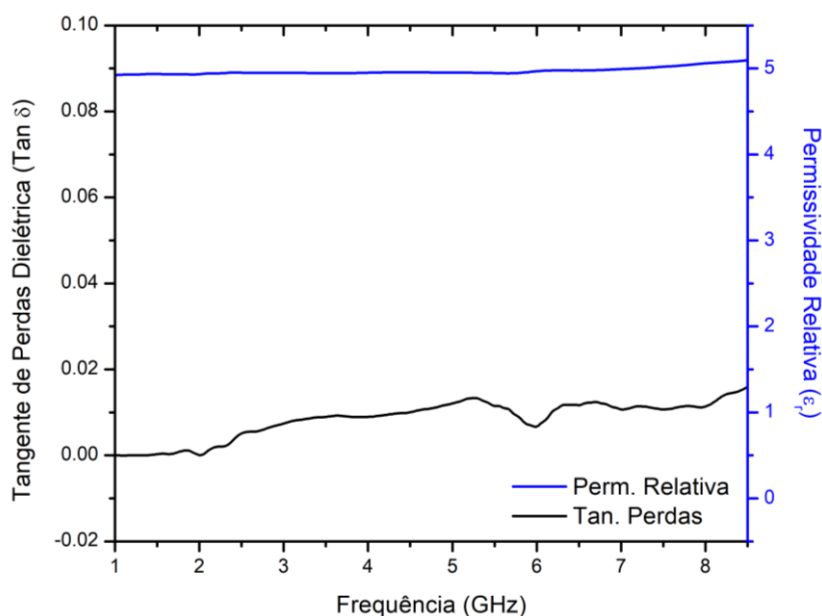
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Estes fatores de concordância são similares aos encontrados em [17], sinalizando boa confiabilidade da caracterização. Após a caracterização estrutural e processo de compactação, foram efetuadas as caracterizações dielétricas.

3.2 Caracterização Dielétrica

A Figura 4 mostra os valores obtidos para permissividade e tangente de perdas em função da frequência de excitação, obtidos na caracterização dielétrica da selenita de cobalto já na forma final. Estes dados, por sua vez, foram implementados no HFSS para simular o comportamento do material como substrato para os *patches* propostos. A permissividade relativa do material oscilou em torno de 5,0, enquanto a tangente de perdas apresentou valores aproximadamente nulos, como se espera em materiais deste tipo.

Figura 4 – Permissividade real e tangente de perdas dielétricas do substrato sintetizado.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Não foi realizada caracterização magnética, no entanto, foram inseridos na simulação das antenas valores de permeabilidade relativa μ_r e tangente de perdas magnéticas $\tan \delta_m$ estimados e ajustados por meio de método recursivo, tomando-se como base os valores determinados em [13] para um material de mesma composição, conforme Tabela 5

Tabela 5 – Parâmetros magnéticos do substrato.

<i>Materiais</i>	μ_r	$\tan \delta_m$
Material em estudo	3,90	0,02
Material sintetizado em [13]	4,10	0,01

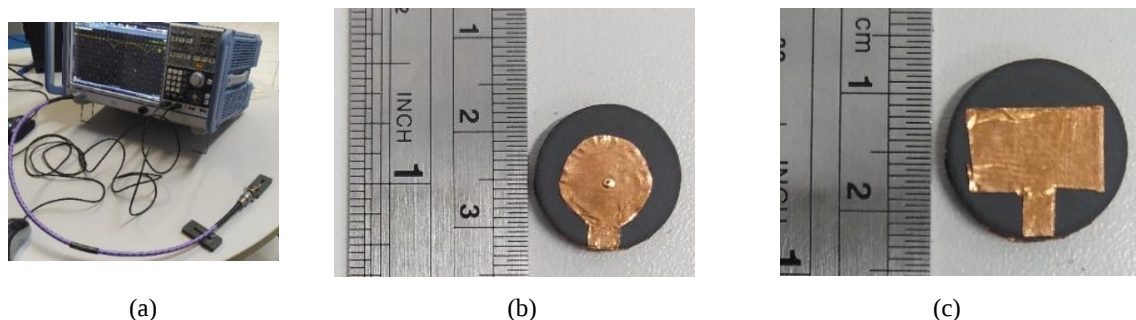
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

É importante salientar que, em [13], os valores obtidos na caracterização estrutural por DRX apresentaram percentuais de massa da fase principal maiores que os obtidos no presente estudo. Um aspecto importante deve ser destacado a partir dessa análise: embora os percentuais de massa na composição tenham sido consideravelmente diferentes, os valores de permeabilidade e tangente de perdas não sofreram grandes modificações, o que pode sinalizar a baixa influência das demais fases no comportamento magnético do material para a faixa de frequência estudada. O efeito dos valores adotados na Tabela 4 bem como a performance do projeto são investigados por meio das medições apresentadas no *Subitem 3.3*.

3.3 Medições no VNA

A Figura 5 mostra o arranjo físico montado para a realização das medições no VNA, bem como as antenas fabricadas e submetidas às medições.

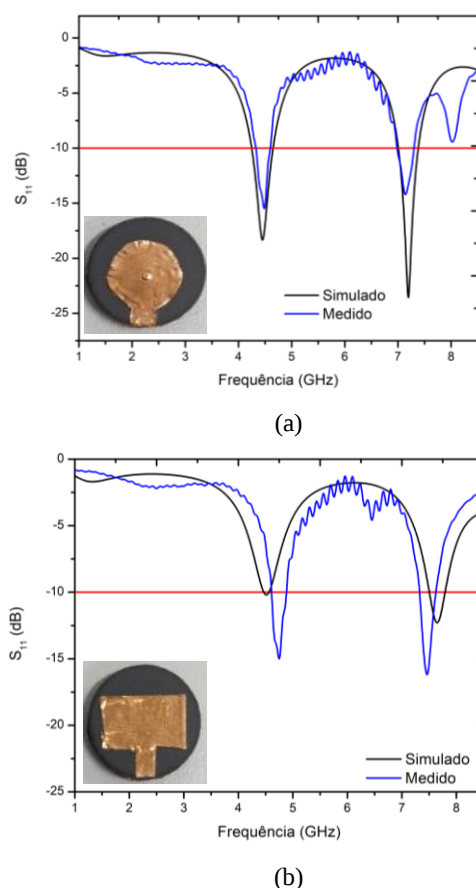
Figura 5 – (a) Estrutura de medição montada no VNA; (b) Antena circular; (c) Antena retangular.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

As medições dos parâmetros $S_{1,1}$ (coeficiente de reflexão) para ambas as antenas estão mostradas na Figura 6, juntamente com as simulações realizadas.

Figura 6 – Coeficiente de reflexão da antena de patch (a) circular e (b) retangular.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Como se pode observar, houve considerável concordância entre simulações e medição, reforçando assim a importância de uma caracterização adequada para a qualidade das simulações. A Tabela 5 apresenta dados quantitativos para melhor visualização e comparação dos resultados para os diferentes modos de propagação apresentados nos gráficos.

Tabela 5 – Comparativo dos principais valores de $S_{1,1}$ obtidos por medição e por simulação.

Parâmetro		Resultados			
		Patch Circular		Patch Retangular	
		Modo 1	Modo 2	Modo 1	Modo 2
Frequência de Ressonância	Simulada (GHz)	4,45	7,20	4,52	7,65
	Medida (GHz)	4,48	7,14	4,75	7,47
	Erro (%)	0,67	0,84	4,84	0,18
Coeficiente de Reflexão	Simulado (dB)	-18,34	-23,56	-10,19	-12,29
	Medido (dB)	-15,49	-14,21	-15,00	-16,18
	Erro (%)	18,40	65,80	32,07	24,04
Largura de Banda	Simulado (GHz)	0,40	0,38	0,09	0,28
	Medido (GHz)	0,27	0,32	0,26	0,29
	Erro (%)	48,15	18,75	65,38	3,45

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022)

Ambas as simulações apresentaram boa concordância com os resultados experimentais, com um erro máximo entre as frequências de ressonância de 4,84% (modo 1, *patch* retangular). O maior erro entre os coeficientes de reflexão foi de 65,80% (modo 2, *patch* circular), e o maior erro entre as larguras de banda foi de 65,38% (modo 1, *patch* retangular). Tais discrepâncias em relação a simulação podem sinalizar problemas relacionados a imprecisões quanto à caracterização dielétrica do material, como no caso dos dados de permeabilidade, e/ou com as dificuldades técnicas em se fabricar manualmente antenas de microfitas com dimensões bastante reduzidas (2,5 mm de largura do *patch*, por exemplo), idênticas às implementadas no software, propostas pelas equações de projeto, e instalá-las no sistema de medição de forma eficaz, de modo a garantir o adequado casamento de impedância.

4 CONCLUSÃO

A obtenção da silenita por meio do método sol-gel confirmou a viabilidade dessa rota de síntese. O material sintetizado apresentou quatro fases distintas, com predominância da fase $\text{Bi}_{13}\text{Co}_{13}\text{O}_{40}$, parcela de grande influência no comportamento magnético do material. A pastilha cilíndrica foi aplicada como substrato para antenas de microfitas nos formatos circular e retangular. As medições de 1,0 a 8,5 GHz sinalizaram ressonância em duas regiões para ambos os casos – 4,48 e 7,14; 4,75 e 7,47 GHz, o que confirma a viabilidade do projeto. Baixa discrepância entre medição e simulação, com erro máximo de 4,48% em uma das frequências de ressonância sinalizaram boa fidelidade das simulações, reforçando-se com isso a importância da caracterização adequada do material para que se possa aproximar ao máximo o seu comportamento em simulações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) pela disponibilidade do local (LabMicro) bem como dos recursos utilizados na sintetização, simulação e medições, fundamentais para a realização dos estudos apresentados e resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- [1] Balanis, C. A. Teoria de Antenas – Análise e Síntese – Vol. 1, 3a. Ed., LTC. 2008.
- [2] Moulson, A. J.; HERBERT, J. M. Electroceramics: materials, properties, applications. 2. ed. Wiley: India, 2003.
- [3] De Moraes, J.E.V et al. Magneto Tuning of a Ferrite Dielectric Resonator Antenna Based on LiFe_5O_8 Matrix. Journal of Elec Materi 47, 3829–3835 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6255-0>.
- [4] G. Muntoni, G. Montisci, G.A. Casula, F.P. Chietera, A. Michel, R. Colella, L. Catarinucci, G. Mazzarella, A curved 3-D printed microstrip patch antenna layout for bandwidth enhancement and size reduction, IEEE Antenn. Wireless Propag. Lett. 19 (2020) 1118–1122, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.2990944>.
- [5] A.T. Castro, S.K. Sharma, Inkjet-printed wideband circularly polarized microstrip patch array antenna on a PET film flexible substrate material, IEEE Antenna. Wireless Propag. Lett. 17 (2017) 176–179, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2779440>.

- [6] S. Nelaturi, N.V.S.N. Sarma, A compact microstrip patch antenna based on metamaterials for Wi-fi and WiMAX applications, *J. of Electromagn. Eng. and Sci.* 18 (2017) 182–187, <https://doi.org/10.26866/jees.2018.18.3.182>.
- [7] N. Rezazadeh, L. Shafai, A compact microstrip patch antenna for civilian GPS interference mitigation, *IEEE Antenna. Wireless Propag. Lett.* 17 (2018) 381–384, <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2790958>.
- [8] U. Rafique, H. Khalil, S.-U. Rehman, Dual-band microstrip patch antenna array for 5G mobile communications, in: Presented at 2017 Prog. In Electromagn. Res. Symp. - Fall (PIERS - FALL), 2017, <https://doi.org/10.1109/PIERSFALL.2017.8293110>.
- [9] N. Rao, V.D. Kumar, Miniaturization of microstrip patch antenna for satellite communication: a novel fractal geometry approach, *Wireless Pers. Commun.* 97 (2017) 3673–3683, <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4691-4>.
- [10] A.G. Al-Sehemi, A.A. Al-Ghamdi, N.T. Dishovsky, P. Malinova, N.T. Atanosov, G. L. Atanasova, Natural rubber composites containing low and high dielectric constant fillers and their application as substrates for compact flexible antennas, *Polym. Polym. Compos.* 29 (4) (2020) 233–245, <https://doi.org/10.1177/0967391120910879>.
- [11] G. Gan, H. Zhang, Q. Li, J. Li, X. Huang, F. Xie, F. Xu, Q. Zhang, M. Li, T. Liang, G. Wang, Low loss, enhanced magneto-dielectric properties of Bi₂O₃ doped Mg-Cd ferrites for high frequency antennas, *J. Alloys Compd.* 735 (2018) 2634–2639, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.002>.
- [12] Jefferson A. Lopes Matias, Isaac B.T. Silva, Matheus E.T. Sousa, João B.L. Oliveira, Marco A. Morales, Djalma R. da Silva, (Bi₁₃Co₁₁)Co₂O₄₀–Co₃O₄ nanocomposites: Synthesis, characterization and application as substrate for microstrip patch antenna, *Ceramics International*, Volume 47, Issue 15, 2021, Pages 21530–21535, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.164>.
- [13] Da Silva, I. B. T. Desenvolvimento de material ferrimagnético do tipo NiFe₂O₄ para aplicação em sistemas de comunicação de micro-ondas. UFRN (2019).
- [14] R.C. Pullar, Hexagonal ferrites: a review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics, *Prog. Mater. Sci.* 57 (2012) 1191–1334, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.04.001>.
- [15] P. Thakur, D. Chahar, S. Taneja, N. Bhalla, A. Thakur, A review on MnZn ferrites: synthesis, characterization and applications, *Ceram. Int.* 46 (2020) 15740–15763, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.287>.
- [16] K.K. Kefeni, T.A.M. Msagati, B.B. Mamba, Ferrite nanoparticles: synthesis, characterisation and applications in electronic device, *Mater. Sci. Eng., B* 215 (2017) 37–55, <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2016.11.002>.
- [17] Jefferson A. Lopes Matias, Evanimék B. Sabino da Silva, Rafael A. Raimundo, Djalma Ribeiro da Silva, João B.L. Oliveira, Marco A. Morales, (Bi₁₃Co₁₁)Co₂O₄₀–Co₃O₄ composites: synthesis, structural and magnetic properties, *J. of Alloys and Compnd.* 852 (2021) 156991, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156991>.
- [18] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, fourth ed., John Wiley & Sons, United States of America, 2011, pp. 147–149.
- [19] C.A. Balanis, *Modern Antenna Handbook*, third ed., John Wiley & Sons, Hoboken, 2005, pp. 826–846.
- [20] *Ansys® High Frequency Structure Simulator (HFSS)*, Release 19.2, ANSYS, Inc.