

Investigação das propriedades dielétricas e da aplicação como antena ressoadora dielétrica do compósito $\text{ZnNb}_2\text{O}_6 - \text{CaTiO}_3$

Lwzardy Antônio Freitas de Azevedo; Renata Silva de Queiroz; Helenilson de Oliveira Barros; Francisco Enilton Alves Nogueira; Juscelino Chaves Sales; Felipe Felix do Carmo; Marcelo Antonio Santos da Silva; João Paulo Costa do Nascimento; Auzuir Ripardo de Alexandria; Antonio Sergio Bezerra Sombra

Resumo — Neste trabalho são apresentadas a análise das propriedades dielétricas e da aplicação como antena ressoadora dielétrica dos compósitos de ZnNb_2O_6 (ZNO) com CaTiO_3 (CTO). As propriedades dielétricas na região de micro-ondas (MO) não mostram nenhuma mudança significativa na permissividade (ϵ'_r), enquanto a adição de 10% mol de CTO resulta em um aumento na perda dielétrica ($\tan \delta$). A estabilidade térmica também foi medida, e o coeficiente de temperatura da frequência de ressonância (τ_f) observado aumentou de -88,95 para -62,93 ppm. $^\circ\text{C}^{-1}$. Simulações numéricas também foram realizadas para avaliar se esses materiais poderiam ser usados como antenas ressonadoras dielétricas, e os resultados mostram um coeficiente de reflexão ($|S_{11}|$) ≥ -10 dB, uma eficiência de radiação de 99,33%, uma largura de banda de 143,11 MHz (3,42%) e um ganho de 6,15 dBi. Os valores obtidos aqui mostram que esses materiais podem ser empregados em dispositivos eletrônicos que atuam na banda C.

Palavras-chave: ZnNb_2O_6 , Propriedades dielétricas, Antena, Compósito cerâmico.

Abstract — This work presents the analysis of the dielectric properties and the application of ZnNb_2O_6 (ZNO) with CaTiO_3 (CTO) composites as dielectric resonator antennas. The dielectric properties in the microwave (MW) region do not show any significant change in permittivity (ϵ'_r), while the addition of 10 mol% of CTO results in an increase in dielectric loss ($\tan \delta$). Thermal stability was also measured, and the temperature coefficient of the resonance frequency (τ_f) observed increased from -88.95 to -62.93 ppm. $^\circ\text{C}^{-1}$. Numerical simulations were also performed to evaluate whether these materials can be used as a dielectric resonator antenna, and the results show a reflection coefficient ($|S_{11}|$) ≥ -10 dB, a radiation efficiency of 99.33%, a bandwidth of 143.11 MHz (3.42%) and a gain of 6.15 dBi. The values obtained here show that these materials can be used in electronic devices operating in the C band.

Keywords: ZnNb_2O_6 , Dielectric properties, Antenna, Ceramic composite.

I. INTRODUÇÃO

Materiais cerâmicos são candidatos interessantes para aplicações específicas, pois é possível combiná-los com outros materiais ou modificar sua estrutura para melhorar suas propriedades dielétricas, ópticas, ferroelásticas, dentre outras. Esses materiais têm sido aplicados na área do meio ambiente, geração de energia, sendo possível destacar aplicação na área de telecomunicações em componentes como substratos, ressonadores e filtros [1 - 3].

Cerâmicas do tipo columbita ($\text{M}^{2+}\text{Nb}_2\text{O}_6$) com estrutura cristalina ortorrômbica e grupo espacial Pbcn têm recebido considerável atenção na literatura, pois suas propriedades elétricas, estruturais, ópticas e magnéticas são de grande interesse para a indústria [2, 4]. Dentre as cerâmicas pertencentes à família da columbita, o ZnNb_2O_6 (ZNO) é de

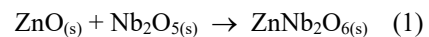
particular interesse, pois este material possui propriedades dielétricas atrativas na região das micro-ondas (MO), como um alto fator de qualidade ($Q \times f = 85.000$ GHz), um coeficiente de temperatura moderado da frequência ressonante ($\tau_f = -88,95$ ppm. $^\circ\text{C}^{-1}$) e uma alta permissividade ($\epsilon'_r > 10$), o que permitiria sua aplicação em dispositivos que operam na faixa das micro-ondas (MO) [2,4].

Neste trabalho foi utilizado o titanato de cálcio (CaTiO_3 - CTO) para a preparação dos compósitos com ZnNb_2O_6 (ZNO), uma vez que o CTO apresenta excelentes propriedades dielétricas na região de micro-ondas, tendo valor de coeficiente de temperatura da frequência ressonante positivo, o que compensaria o valor negativo da fase ZNO. Dessa forma será feita a avaliação das propriedades dielétricas do compósito proposto bem como será realizado um estudo de simulação numérica para verificar o comportamento desse material como antena ressoadora dielétrica e assim será possível verificar se o material pode ser usado em aplicações na região de micro-ondas.

II. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A. Produção do compósito de ZNO10

A reação de síntese da fase cerâmica ZNO é proposta a seguir na equação (1):



Após a pesagem dos óxidos reagentes de ZnO e Nb_2O_5 , estes foram colocados em recipiente de poliacetal junto com 97,8g de esferas de óxido de zircônio (ZrO_2). Em seguida, esse recipiente foi inserido em moinho planetário da marca Fritsch modelo Pulverisette 5 usando rotação de 360 rpm por 4 horas.

Após a moagem dos óxidos, o pó do material obtido foi colocado em cadinho de alumina para ser calcinado em 1100 $^\circ\text{C}$ por 4 horas com taxa de aquecimento de 5 $^\circ\text{C}/\text{min}$. Durante esta etapa, ocorre a reação entre os óxidos reagentes para a formação da fase cerâmica ZnNb_2O_6 (ZNO).

Com a formação da fase cerâmica ZNO foi feita a adição de 10% em massa de titanato de cálcio (CaTiO_3), sendo que a homogeneização desse material foi realizada através de maceração com almofariz e pistilo de porcelana durante o período de 5 minutos.

O pó moído foi colocado dentro de molde metálico e em seguida submetidos à pressão de 15 MPa por um período de 5 minutos para obtenção de um compósito em formato de cilindro cerâmico a ser usado nas medidas de antena ressoadora dielétrica (ARD). Esse compósito foi chamado de ZNO10 e foi sinterizada a 1150 $^\circ\text{C}$ por um período de 4 horas, com taxa de aquecimento de 5 $^\circ\text{C}/\text{min}$, sendo retirado quando o forno atingiu a temperatura ambiente.

B. Medidas Dielétricas em Micro-ondas.

As medidas dielétricas do compósito ZNO10 foram feitas com o uso da técnica Hakki-Coleman usando um analisador de rede para calcular a permissividade relativa (ϵ'_r) e a tangente de perda dielétrica ($\tan \delta$) do material [5]. A técnica Hakki-Coleman é amplamente utilizada para determinar as propriedades dielétricas de materiais cerâmicos na região de micro-ondas.

A amostra foi excitada por uma sonda conectada a uma das portas do analisador (conforme pode ser observado da Figura 1). As amostras foram colocadas sobre o plano de terra e excitado por um eletrodo coaxial. A sonda coaxial fixada ao plano de terra é conectada ao cabo do analisador de rede por um conector SMA.



Fig. 1. Analisador de rede para medidas das propriedades em micro-ondas.

Os valores de constante dielétrica (ϵ'_r) e da tangente de perda dielétrica ($\tan \delta$) foram obtidos na frequência de ressonância do modo TE_{011} em temperatura ambiente que foi de 4,23 GHz. As propriedades dielétricas, diâmetro e altura da amostra em formato cilíndrico do compósito ZNO10, obtidas na região de micro-ondas, estão descritos na Tabela I.

TABELA I. PROPRIEDADES DIELÉTRICAS OBTIDAS NA REGIÃO DE MICRO-ONDAS.

Amostra	D (mm)	H (mm)	ϵ'_r	$\tan \delta$
ZNO10	13,11	6,51	25,57	$9,60 \cdot 10^{-4}$

O parâmetro que indica a estabilidade térmica do ressonador é conhecido como coeficiente de temperatura na frequência de ressonância (τ_f). Ele indica o quanto a frequência de ressonância varia com a mudança de temperatura e foi calculado pela equação abaixo:

$$\tau_f = \frac{1}{f} \cdot \frac{\Delta f}{\Delta T} \cdot 10^6 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$$

Para obtenção das medidas de τ_f foi utilizada uma câmera de aquecimento para avaliar o deslocamento do modo $HE_{11\delta}$ com o aumento da temperatura, sendo que a faixa de temperatura estudada foi de 30 a 80°C. A Figura 2 apresenta o resultado obtido para o τ_f onde é possível observar que com o

aumento da temperatura a frequência se desloca para menores valores.

Para a amostra ZNO10 foi observado um $\tau_f = -62,93 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$, que é um valor maior e mais próximo do valor de $\pm 10 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$ do que o valor de τ_f da amostra de ZNO pura. Levando em consideração os resultados obtidos para ϵ'_r , $\tan \delta$ e τ_f pode-se afirmar que o material apresenta grande potencial de aplicação em dispositivos que operem em micro-ondas.

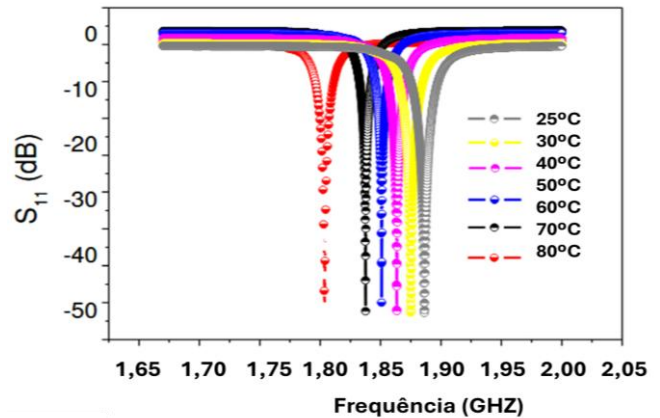


Fig. 2. Efeito da temperatura sobre a frequência de ressonância da amostra ZNO10.

C. Simulação Numérica no HFSS

Os dados experimentais obtidos da perda de retorno (S_{11}), frequência de operação, e impedâncias real e imaginária foram obtidas em temperatura ambiente (26 °C) através de medidas de monopolo. O equipamento utilizado para medição das amostras em forma de cilindro cerâmico foi um analisador de rede da Agilent modelo PNA-L. As medidas foram obtidas da frequência de ressonância do modo TE_{011} e a Figura 3 apresenta a configuração do sistema de monopolo.

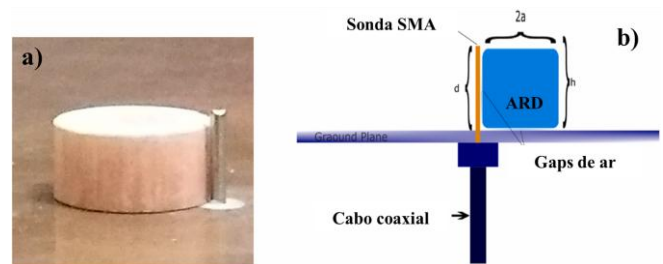


Fig. 3. Configurações experimental (a) e simulada (b) para as medidas de monopolo.

Para analisar o comportamento da amostra do ZNO10 operando como antena foi utilizado o software HFSS® (High Frequency Structural Simulation) da Ansoft Corporation. Este software é amplamente utilizado no design de antenas, estudo e elaboração de elementos complexos de circuitos eletrônicos de RF, incluindo filtros e linhas de transmissão.

A simulação numérica foi alimentada com os parâmetros dielétricos de permissividade (ϵ'_r) e tangente de perda dielétrica ($\tan \delta$) obtidos pelo método Hakki-Coleman. Além disso, as características geométricas da ARD e os gaps de ar

gerados pelas imperfeições do cilindro cerâmico, plano de terra e da sonda, foram considerados como ponto de partida para a simulação no HFSS.

A validação do modelo numérico foi realizada através da comparação entre as medidas experimentais e simuladas do coeficiente de reflexão ($|S_{11}|$) e das impedâncias apresentadas pela amostra estudada.

Nos gráficos do coeficiente de reflexão obtidos tanto por simulação numérica quanto experimental, apresentados na Figura 4, é possível observar boa concordância entre o experimental e o simulado, demonstrando que a simulação realizada é adequada. Além disso, observa-se que o coeficiente de reflexão obtido é bem menor do que -10 dB, indicando que a amostra ZNO10 funciona como antena ressoadora dielétrica.

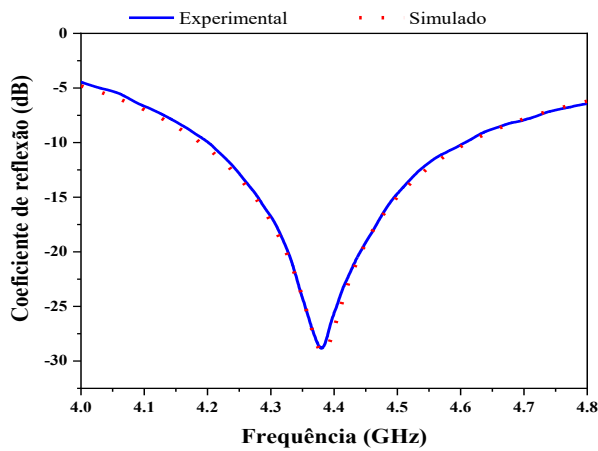


Fig. 4. Perda de Retorno da Antena simulado e experimental da Antena ZNO10.

Ainda com relação a Figura 4, pôde-se calcular o valor percentual a largura de banda no coeficiente de reflexão a -10 dB dessa antena, sendo obtido um valor de 3,42% (uma largura de banda de 143,11 MHz). Como observado, a antena opera na frequência de 4,37 GHz, logo o material opera na Banda C da região de micro-ondas.

Uma vez que o modelo teórico se mostrou válido, os parâmetros de campo distante foram obtidos a partir da simulação realizada no software HFSS, sendo que os valores obtidos são apresentados na Tabela II.

TABELA II. PARÂMETROS DE CAMPO DISTANTE OBTIDOS PARA A AMOSTRA ZNO10 ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA NO HFSS.

Amostra	Eficiência (%)	Ganho (dBi)	Directividade (dBi)
ZNO10	99,33	5,24	5,27

Como é possível notar, a amostra ZNO10 apresentou excelentes valores de ganho e eficiência confirmando que o material avaliado seria um candidato promissor para aplicações na banda C podendo ser aplicado para aplicações em antenas ressoadoras dielétricas (ARD) em comunicações por satélite, especialmente na frequência de 4,37 GHz. Essa

frequência é relevante para comunicação de dados, transmissão de TV e internet de banda larga via satélite.

III. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi demonstrado que com a adição de 10% em massa de titanato de cálcio (CaTiO_3) com melhorias das propriedades dielétricas em relação ao ZNO puro. Com relação a avaliação do compósito como antena, foi possível notar que o modelo de simulação numérica se mostrou adequado visto que o erro calculado para o coeficiente de reflexão (S_{11}) foi baixo. Com relação aos parâmetros de campo distante observados, o valor de ganho de 5,56 dBi e a eficiência acima de 98% combinado com a baixa perda de retorno e a alta constante dielétrica demonstram que a amostra ZNO10 seria um candidato interessante para aplicações na banda C podendo ser usado em aplicações em internet de banda larga via satélite.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET) do IFCE, campus Fortaleza. Ao CNPq pela oferta de bolsa. Ao Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM) da Universidade Federal do Ceará.

REFERÊNCIAS

- [1] A. V. Kumar, V. Subramanian, V. Sivasubramanian. Enhanced microwave dielectric properties of ZnNb_2O_6 by heterovalent ion substitution. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 944, p. 169202, 2023.
- [2] T. H. de Vasconcelos, et al. Dielectric properties of ZnNb_2O_6 - $\text{ZnTiNb}_2\text{O}_8$ composites for microwave applications. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, v. 184, p. 111705, 2024.
- [3] Solid State Reaction, *Material Science and Engineering*, 2018.
- [4] Sung-Yun Lee, et al. Copper, zinc, and manganese niobates (CuNb_2O_6 , ZnNb_2O_6 , and MnNb_2O_6): structural characteristics, Li^+ storage properties, and working mechanisms. *Inorganic Chemistry Frontiers*, v. 17, p. 3176, 2020.
- [5] Hakki & Coleman, *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1960