



TÍTULO DO TRABALHO

DISPOSITIVOS ELETROCERÂMICOS COM ALTA CONSTANTE DIELÉTRICA E BAIXA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

TÍTULO EM INGLÊS

ELECTROCERAMIC DEVICES WITH HIGH DIELECTRIC CONSTANT AND LOW ELECTRICAL RESISTIVITY

Mateus F. C. Gomes¹, Kaik K. S. Rodrigues^{1*} e Fábio H. S. Sales¹

1 - Departamento de Física (DEFIS), Instituto Federal do Maranhão (IFMA) Campos Monte Castelo.
São Luís, MA, Brasil.

Kaik.kaua@acad.ifma.edu.br

RESUMO

Este estudo investiga as propriedades elétricas e magnéticas de compostos cerâmicos à base de Óxido de Zinco (ZnO), puro e dopado com Óxido de Nióbio (Nb₂O₅), com o objetivo de desenvolver pastilhas capacitivas e resistivas para aplicação na indústria de dispositivos eletrocerâmicos. As amostras de ZnO foram analisadas após o processo de sinterização, revelando uma redução consistente na massa, indicando a remoção de voláteis e compactação do material. As amostras exibiram uma ampla gama de valores de resistência (Rs) e capacitância (Cs) conforme a frequência e temperatura variava, atribuídos a diferenças na estrutura cristalina e presença de impurezas. As amostras dopadas com (Nb₂O₅) mostraram comportamentos elétricos semelhantes ao (ZnO) puro, mas com variações específicas, destacando a influência da dopagem nas propriedades do material. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Física Aplicada do Departamento de Física do Campus São Luís – Monte Castelo, utilizando técnicas específicas para a investigação da estrutura e do comportamento desses materiais.

Palavras-chave: Eletrocerâmicas; Óxido de Zinco; Óxido de Nióbio; Propriedades elétricas; Propriedades magnéticas.

ABSTRACT

This study investigates the electrical and magnetic properties of ceramic compounds based on Zinc Oxide (ZnO), both pure and doped with Niobium Oxide (Nb₂O₅), with the aim of developing capacitive and resistive pellets for application in the electroceramic device industry. The ZnO samples were analyzed after the sintering process, revealing a consistent reduction in mass, indicating the removal of volatiles and material compaction. The samples exhibited a wide range of resistance (Rs) and capacitance (Cs) values as frequency and temperature varied, attributed to differences in the crystal structure and the presence of impurities. The samples doped with (Nb₂O₅) showed electrical behavior similar to pure (ZnO), but with specific variations, highlighting the influence of doping on the material's properties.

These analyses were carried out in the Applied Physics Laboratory of the Physics Department at the São Luís – Monte Castelo Campus, using specific techniques for investigating the structure and behavior of these materials.

Keywords: *Electroceramics; Zinc Oxide; Niobium Oxide; Electrical properties; Magnetic properties.*

INTRODUÇÃO

A “memória” é um fator primordial para o perfeito funcionamento de muitos sistemas físicos, incluindo o próprio corpo humano. Sem ela, nós mesmo não funcionamos direito, e na maioria das vezes em que nossa memória quer realizar várias funções ao mesmo tempo, o rendimento de toda essa multifuncionalidade neural acaba sendo insatisfatório [1,2]. Imaginando-se agora uma memória artificial eletrônica conectada em diferentes circuitos e capaz de realizar múltiplas funções, com certeza, na estrutura interna desta memória há a presença de material eletrocerâmico [1-3].

Com os avanços da nanotecnologia e da spintrônica, a indústria eletrônica tem mostrado um interesse crescente em dispositivos eletrônicos eletrocerâmicos [1-3]. Isso se deve ao fato de que os materiais cerâmicos convencionais não são mais capazes de atender a todas as demandas dessas indústrias. Com base nessa motivação, houve um aumento na quantidade de pesquisas voltadas para o desenvolvimento de eletrocerâmicas.

As eletrocerâmicas, quando submetidas um campo externo, como por exemplo, um campo eletromagnético, podem apresentar alterações em suas propriedades elétricas e magnéticas, como na condutividade elétrica, histerese magnética e outros parâmetros elétricos e/ou magnéticos. Isso as torna extremamente versáteis e aplicáveis em uma variedade de contextos, como sensores fotovoltaicos (convertendo luz em eletricidade), termo geradores de energia (convertendo energia térmica em eletricidade e vice-versa), células de combustível, células solares híbridas, componente de memórias ferroelétricas ("smartcards") e resistivas, varistores, dispositivo para refrigeradores magnéticos, sistemas magnéticos de leitura e gravação de dados, capacitores, transdutores, entre outros [1-6].

Tais aplicabilidades e possibilidades fornecidas pelas eletrocerâmicas configuram como fator primordial e motivacional para qualquer projeto investigativo com viés tecnológico e de inovação que queira enveredar na área de atuação de dispositivos eletrônicos.

Os compostos cerâmicos à base de Óxido de Zinco (ZnO) representam materiais altamente promissores em diversas áreas de aplicação como: catálise, células fotovoltaicas, dispositivos eletrônicos, entre outros. Encontrado na natureza no mineral zincita sendo um semicondutor do tipo N, o que significa que as impurezas que se ligam à sua rede cristalina (dopantes) apresentam elétrons de valência livres que poderão circular ao longo das vacâncias, devido à sua boa mobilidade eletrônica [7].

Esse material tem sido amplamente utilizado na indústria cosmética devido à sua propriedade atenuante de absorver e dispersar a radiação UV. Sendo assim, frequentemente incorporado aos mais diversos produtos com objetivo de filtrar esses espectros de absorção [8].

MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira fase do projeto, com duração de três meses, foi dedicada à exploração aprofundada dos fundamentos dos materiais cerâmicos. O objetivo principal foi compreender as aplicações, propriedades e outras características relevantes das cerâmicas. Para alcançar esse objetivo, foram implementadas diversas atividades, incluindo:

Revisão Bibliográfica: Foi realizada uma revisão extensiva de artigos científicos e livros especializados sobre materiais cerâmicos. Essa revisão abrangeu uma variedade de fontes para garantir uma compreensão abrangente do tema.

Discussões Semanais: Foram organizadas reuniões semanais focadas especificamente nos temas abordados na revisão bibliográfica. Essas discussões foram fundamentais para aprofundar o entendimento, esclarecer dúvidas e identificar lacunas no conhecimento.

Análise Comparativa: Foi conduzida uma análise comparativa das diferentes aplicações e propriedades das cerâmicas, buscando identificar padrões e tendências relevantes para o contexto de pesquisa.

Experimentação Preliminar: Quando apropriado, foram realizados experimentos preliminares para testar algumas das propriedades das cerâmicas discutidas na literatura. Esses experimentos foram projetados para fornecer entendimentos práticos e complementar a compreensão teórica. Ao término dessa etapa, esperava-se ter alcançado um conhecimento sólido e abrangente dos fundamentos dos materiais cerâmicos, proporcionando uma base consistente para as próximas fases do projeto. Após atingir um nível adequado de exploração desses conceitos e estabelecer um embasamento teórico sólido sobre o tema, foi decidido que era o momento oportuno para avançar para a fase de experimentação prática. Optou-se por iniciar essa etapa com a produção de amostras, utilizando como foco inicial o óxido de zinco (ZnO).

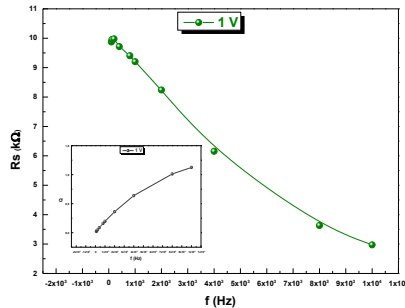
Após consultar artigos semelhantes, foi determinada a utilização de uma massa inicial de 0,8g de óxido de zinco (ZnO) puro para a fabricação das primeiras amostras. Em seguida, o processo de produção das amostras foi iniciado.

Ao concluir essa etapa, procedeu-se à produção das pastilhas de Óxido de Nióbio (Nb_2O_5) puro e, em seguida, às pastilhas dopadas, em que 95% da massa foi constituída de ZnO e 5% de Nb_2O_5 .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

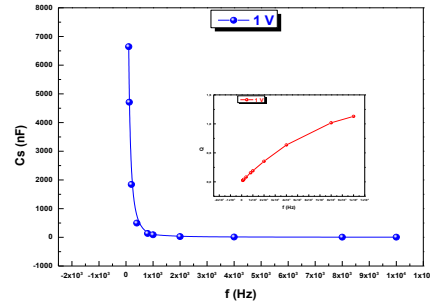
Amostra 1 (32) - $ZnO + 10\% Nb_2O_5$				
Massa 1 = 0,8 g (antes da sinterização)		Massa 2 = 0,725 g (após sinterização)		
Diâmetro = 8,03 mm		Raio = 4,015 mm		Espessura = 3,04 mm
Frequência	R_s (k Ω)	Q	Cs (nF)	Q
100 Hz	9,874	0,0229	6.646	0,0243
120 Hz	9,955	0,0285	4.709	0,0286
200 Hz	9,980	0,0460	1.842,7	0,0442
400 Hz	9,715	0,0861	496,2	0,0828
800 Hz	9,406	0,1604	135,60	0,1560
1 kHz	9,204	0,1956	90,15	0,1904
2 kHz	8,240	0,3621	27,288	0,3550
4 kHz	6,154	0,6399	10,063	0,6363
8 kHz	3,6292	1,0124	5,359	1,0182
10 kHz	2,9720	1,1250	4,711	1,1298

Gráfico 1 (amostra 1) Resistência X Frequência



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 2 (amostra 1) Capacitância X Frequência



Fonte: Autoria própria.

Amostra 2 (32) – $ZnO + 10\% Nb_2O_5$ (Variação de Temperatura)

Massa 1 = 0,8 g (antes da sinterização)

Massa 2 = 0,725 g (após sinterização)

Diâmetro = 8,03 mm

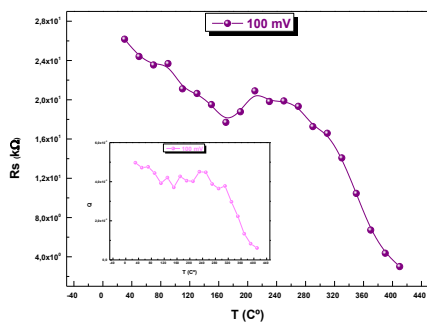
Raio = 4,015 mm

Espessura = 3,04 mm

Temperatura (°C)	Rs (kΩ)	Q	Cs (μF)	Q	Ls (H)	Q
30 °C	26,167		1,2608	-2,1067		0,0497
50 °C	24,408		1,3867	-1,8631		0,0472
70 °C	23,542		1,3361	-1,7590		0,0476
90 °C	23,688		1,4723	-1,8227		0,0444
110 °C	21,115		1,9250	-1,1989		0,0392
130 °C	20,641		1,7244	-1,2677		0,0421
150 °C	19,508		2,2228	-1,3086		0,0371
170 °C	17,702		2,2717	-1,3018		0,0427
190 °C	18,779		1,7443	-1,7184		0,0405
210 °C	20,899		1,9352	-1,0606		0,0402
230 °C	19,822		1,9864	-1,7476		0,0451
250 °C	19,879		1,7976	-1,3816		0,0448
270 °C	19,328		2,4787	-1,1836		0,0388

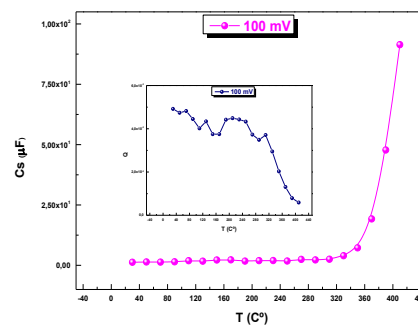
290 °C	17,269	2,2381	-1,0587	0,0365
310 °C	16,582	2,5304	-0,87752	0,0378
330 °C	14,075	3,9722	-0,52344	0,0297
350 °C	10,459	7,249	-0,31554	0,0223
370 °C	6,726	19,222	-0,12357	0,0134
390 °C	4,367	47,79	-0,050044	0,0083
410 °C	3,0052	91,42	-0,022584	0,0061

Gráfico 3 (amostra 2) Resistência X Frequência



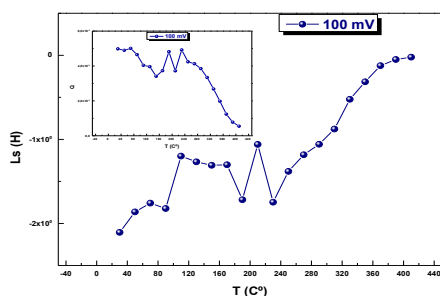
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 4 (amostra 2) Capacitância X Frequência



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 5 (amostra 2) Indutância X Frequência



Fonte: Autoria própria.

A análise das amostras de ZnO revelou uma variedade de comportamentos elétricos, sugerindo possíveis variações na composição, estrutura ou processamento do material. Ao considerar a massa antes e após a sinterização, observou-se uma redução consistente em todas as amostras,

indicando a remoção de voláteis e compactação durante o processo. Essa diminuição contribui para melhorar a densidade e as propriedades mecânicas do material.

As dimensões das amostras permaneceram uniformes, refletindo consistência no processo de fabricação e garantindo resultados confiáveis e reprodutíveis. Em relação à resistência (R_s), as amostras exibiram uma ampla gama de valores em diferentes frequências. Algumas mostraram aumento da resistência com o aumento da frequência, enquanto outras mantiveram resistência constante ou diminuíram. Essa variação pode ser atribuída a diferenças na estrutura cristalina, presença de impurezas ou defeitos estruturais.

A capacitância (C_s) também variou entre as amostras em diferentes frequências. Embora a tendência geral tenha sido de diminuição da capacitância com o aumento da frequência, as variações específicas sugerem influências como densidade de carga superficial ou presença de interfaces. A qualidade (Q) mostrou variação com a frequência, indicando complexidade nas interações elétricas. A presença de picos de alta qualidade em certas frequências sugere a existência de ressonâncias ou modos de oscilação específicos.

Além disso, algumas amostras apresentaram comportamentos peculiares, como valores negativos de capacitância e resistência muito altos em baixas frequências, os quais podem ser atribuídos a efeitos materiais específicos ou a erros experimentais. Considerando os óxidos de nióbio, como o pentóxido de nióbio (Nb_2O_5), juntamente com os resultados das amostras, observou-se uma concordância geral com as características típicas do Nb_2O_5 , mas também variações nas propriedades elétricas e físicas. Essas diferenças podem ser atribuídas a diferenças na composição, estrutura ou condições de síntese.

As amostras dopadas com 5%, 10% e 15% de Nb_2O_5 exibiram comportamentos elétricos semelhantes, mas com variações específicas em resistência, capacitância e qualidade. Essas variações são cruciais para entender o impacto da dopagem de nióbio nas propriedades do ZnO e explorar seu potencial em diversas aplicações tecnológicas. Observa-se ainda que a resistência aumenta com a concentração de Nb_2O_5 . Ao passo que a capacitância tende a diminuir com a frequência e a concentração de Nb_2O_5 .

Analisando o efeito da temperatura nas amostras puras de ZnO constata-se que a resistência diminui com o aumento da temperatura, fato que é típico de materiais semicondutores, isso ocorre pois o aumento de temperatura reduz a resistividade devido ao aumento da mobilidade dos portadores de carga. Enquanto a capacitância aumenta com a temperatura, o que pode ser atribuído ao aumento da constante dielétrica em relação a temperatura, verifica-se também valores relativamente baixos de indutância.

Por fim, nas amostras dopadas com Nb_2O_5 nota-se semelhanças às puras, visto que a resistência diminui com o aumento da temperatura. A capacitância aumenta conforme a temperatura. Contudo, as variações são menores, efeito provavelmente causado pela dopagem que afeta a resposta dielétrica. A indutância nas amostras dopadas também é baixa.

CONCLUSÕES

O estudo das propriedades elétricas e magnéticas de compostos eletrocerâmicos à base de ZnO puro e dopado com diferentes concentrações de Nb_2O_5 exprimi informações significativas sobre o comportamento desses materiais. Nesse sentido, os resultados elétricos indicaram uma variação considerável na resistência e na capacitância das amostras em diferentes frequências e temperaturas.

Em síntese, a pesquisa ratificou que a dopagem com Nb_2O_5 pode ser uma estratégia eficaz para regular as propriedades elétricas e magnéticas do ZnO , oferecendo inúmeras possibilidades de otimização de dispositivos eletrocerâmicos. Dessa maneira, fica evidente que a compreensão dessas variações e a capacidade de controlar as propriedades dos materiais são de fundamental

importância para o desenvolvimento de tecnologias avançadas e inovadoras no campo dos dispositivos eletrônicos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a FAPEMA pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa, ao Instituto Federal do Maranhão, Campus IFMA Monte Castelo, pelo suporte de infraestrutura oferecido, ao meu dedicado orientador Professor Fábio Sales e a todos os participantes do grupo de pesquisa, em especial ao dedicado voluntário Mateus Gomes, muito obrigado.

REFERÊNCIAS

- [1] BERTOTTI, G. **Hysteresis in Magnetism**, Academic Press, San Diego, 1998.
- [2] BLUNDELL, S. **Magnetism in Condensed Matter**, Oxford University, Press, New York, 2001.
- [3] BUONOCORE, A. L. W., SALES, F. et.al. **Varistor behavior in a ternary system based on SnO₂ doped with a hexavalent donor: SnO₂-MnO₂-WO₃**. JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS, v. 1, p. 1, 2019.
- [4] CALLISTER, W. D. J. **Ciência e Engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC/Livros Técnicos e Científicos, 2012.
- [5] CARTER, C. B.; NORTON, M. G.. **Ceramic materials: science and engineering**. 2nd. ed. New York, US: Springer, c2013. xxii, 766 p. ISBN 9781461435228.
- [6] CARVALHO, A. N. C.; SALES, F. H. S. **Propriedades elétricas de BaTiO₃ dopado com SiO₂ e Bi₂O₃**. Holos, (1), 127-136, 2019.
- [7] COEY, J. M. D. **Magnetism and magnetic materials**, Cambridge University, Press, New York, 2010.
- [8] CULLITY, B. D., GRAHAM, C. D. **Introduction to magnetic materials**, Wiley Press, New Jersey, 2009.
- [9] DJURISIC, A. B.; XING, A. M. C.; CHEN, X. Y. **ZnO nanostructures for optoelectronics: Material properties and device applications**. Progress in Quantum Electronics., v. 34, p. 191, 2010.
- [10] F., C. K.; R., H. X.; C., Z. L. **Fabrication, properties and sintering of ZnO nanopowder**. Materials Letters, v. 62, n. 2008, p. 1223.
- [11] FURLANI, E. P. **Permanent Magnet and Electromechanical Devices**, Academic Press, New York, 2001.
- [12] HOSKEN, C. M. **Síntese e Caracterização Elétrica de Cerâmicas Varistoras à Base de ZnO**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 110. 2006.
- [13] JANOTTI, A.; VAN DE WALLE, C. G. **Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor**. Reports on Progress in Physics, v. 72, p. 126-501, 2009.
- [14] JEARL WALK, D. H. R. R. **Fundamentos da Física, volume 3**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos, v. 3, 2016.
- [15] KINGERY, W. D., Bowen, H. K., Uhlmann, D. R. **Introduction to ceramics**. 2nd. ed. New York, Wiley-Interscience, 1976.
- [16] MEDEIROS FILHO, F. C., MELLO, V. D., DANTAS, A. L., SALES, F. H. S., CARRIÇO, A. S. **Giant magnetocaloric effect of thin Ho films**. J. Appl. Phys. 109, 07A914 (2011).
- [17] MOULSON, J. A. ; HERBERT, J. M. **Electroceramics: Materials, Properties, Applications**. 2.ed. England. 2003.
- [18] NIU, X. et al. **Enhanced electrocaloric effect at room temperature in Mn²⁺ doped lead-free (BaSr)TiO₃ ceramics via a direct measurement**, J. Adv. Ceram. 10(3): 1–11 (2021).
- [19] PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades**, Hemus Editora, 2007. ISBN: 8528904423.
- [20] PURCELL, E. M., **Berkeley physics course - Volumen 2: Eletricidad y magnetismo**, Editorial Reverté, Barcelona, 2001.