

ESTUDO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS EM ELETROCERÂMICAS COM APLICAÇÃO EM CÉLULAS SOLARES: SÍNTESE, SINTERIZAÇÃO E ANÁLISE NO LABORATÓRIO DE INOVAÇÃO DO IFMA SÃO LUÍS MONTE CASTELO

Valléria C. F. Barros ⁽¹⁾ (vchristynne@acad.ifma.edu.br), Hellen B. C. Mendes ⁽²⁾ (hellenb@acad.ifma.edu.br), Klebson M. S. Mendes ⁽³⁾ (klebsonmax@acad.ifma.edu.br), Fabio H. S. Sales ⁽⁴⁾ (fsales@ifma.edu.br);

⁽¹⁾Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA);
Departamento de Física;

RESUMO: Este trabalho apresenta o estudo das propriedades elétricas de eletrocerâmicas à base de óxido de zinco (ZnO), puro e dopado com óxido de níquel (NiO), visando compreender os efeitos da dopagem na resposta dielétrica e condutiva do material. As amostras foram sintetizadas por prensagem uniaxial e sinterizadas a alta temperatura, sendo posteriormente caracterizadas por medidas elétricas em ampla faixa de frequência e tensão utilizando ponte LCR. Os resultados mostraram que a adição de NiO promove alterações significativas na capacitância e na resistência elétrica, especialmente em altas frequências, indicando a influência direta da dopagem e da microestrutura nos mecanismos de condução. Embora as amostras não tenham apresentado comportamento adequado para aplicação fotovoltaica, observou-se potencial promissor para uso em dispositivos eletrônicos e sensores, reforçando a importância do estudo de dopantes em cerâmicas semicondutoras.

PALAVRAS-CHAVE: Eletro cerâmicas, Óxido de Zinco (ZnO), Óxido de Níquel (NiO), Propriedades elétricas.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem-se observado um crescente interesse acadêmico e tecnológico em torno dos semicondutores cerâmicos, motivado por sua ampla aplicabilidade em dispositivos eletrônicos, pelo papel central no desenvolvimento de tecnologias voltadas à geração de energias renováveis e pelo potencial impacto na indústria, na economia local e no meio científico. Nesse contexto, diversas iniciativas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de aprofundar a compreensão sobre essas estruturas funcionais e propor soluções inovadoras para desafios emergentes.

¹Prof. Me. Fábio H. S. Sales, Instituto Federal do Maranhão – IFMA, Campus São Luís Monte Castelo.
E-mail: fsales@ifma.edu.br

Graças à colaboração entre múltiplas áreas do conhecimento, o desenvolvimento de materiais nanoestruturados tem ganhado destaque na comunidade científica, permitindo a criação de compostos com propriedades físicas e químicas aprimoradas.

Apesar dos avanços alcançados, ainda existem lacunas significativas no que se refere aos óxidos semicondutores cerâmicos. Tal realidade evidencia a necessidade de investigações mais aprofundadas, especialmente no que diz respeito à dopagem desses compostos, visto que esse processo permite identificar novas propriedades e promover melhorias nas características já conhecidas, contribuindo assim para o avanço das práticas e aplicações existentes.

Um exemplo notável nesse campo é o óxido de zinco (ZnO), um composto versátil que tem despertado interesse na comunidade científica por ser relativamente simples de sintetizar e altamente aplicável em diversas tecnologias. Por se tratar de um semicondutor cerâmico, destaca-se por apresentar um bandgap óptico largo ($\sim 3,37$ eV) e uma alta energia de ligação de éxcitons (60 meV) (SILVA, 2019, p. 19). Através da adição controlada de impurezas, em pequenas quantidades, com o objetivo de provocar alterações microestruturais, torna-se possível aprimorar suas propriedades e obter novos atributos, que serão devidamente investigados.

2. METODOLOGIA

O projeto foi iniciado com uma extensa revisão da literatura, onde artigos e materiais de consulta foram analisados para embasar nossas escolhas. A partir de pesquisas sobre o óxido de zinco, decidimos que este seria o material base para a fabricação das amostras cerâmicas, dada sua ampla aplicação em dispositivos eletrônicos e cerâmicos, além das propriedades mecânicas e térmicas favoráveis. A escolha pelo tamanho das amostras de 0,5 g foi motivada pela necessidade de otimizar o uso de materiais e pela tendência de miniaturização dos componentes eletrônicos, que exigem amostras compactas, mas suficientemente densas para garantir desempenho.

2.1 Fabricação das Amostras

Após a definição dos materiais e parâmetros experimentais, iniciou-se o processo de fabricação das amostras cerâmicas. Essa etapa foi estruturada em fases sequenciais, visando garantir a homogeneidade dos compostos, a adequada preparação da matéria-prima e a obtenção de corpos cerâmicos com propriedades compatíveis às necessidades do estudo. A seguir, são descritas as etapas realizadas.

2.1.1 Peneiração dos Compostos

A peneiração constituiu a etapa inicial na preparação dos materiais cerâmicos, utilizando uma malha de 0,075 mm para uniformizar o material base e o dopante, garantindo distribuição

homogênea das partículas. Esse procedimento favorece a eficiência da síntese em altas temperaturas, preparando o material para o processamento subsequente.

A homogeneização obtida pela peneiração melhora a interação entre partículas, facilitando a difusão iônica e fortalecendo as ligações durante a sinterização. Com isso, o material final apresenta maior densificação, melhores propriedades mecânicas e microestrutura refinada, além de reduzir aglomerados, assegurando uniformidade e desempenho elevado das cerâmicas (SILVA; PEREIRA; MENDONÇA FILHO, 2014).

2.1.2 Homogeneização dos Reagentes

A homogeneização dos reagentes é essencial para garantir um processo de síntese uniforme e eficiente. Durante o trabalho, vários métodos foram analisados, mas muitos apresentavam risco de contaminação, como a mistura manual com almofariz e pistilo ou o uso de moinhos de ágata, que podem introduzir impurezas pelo contato direto com os reagentes, conforme Best (1977). Buscando uma alternativa mais segura e eficaz, desenvolvemos um método baseado em banho ultrassônico, técnica difundida para dispersar partículas em líquidos por meio de ondas sonoras de alta frequência que provocam vibrações rápidas. Esse efeito cavitacional, resultado da formação e colapso de microbolhas, distribui as partículas de maneira uniforme sem contato físico direto. A Figura 1 ilustra o processo de homogeneização dos reagentes utilizando o banho ultrassônico.

Figura 1 - Homogeneização dos Reagentes.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Usar o ultrassom em soluções alcoólicas, como o etanol a 99%, é extremamente eficiente para dispersar partículas finas e reduzir a formação de aglomerados, o que é fundamental para garantir uma boa homogeneização dos reagentes.

Foram realizados diversos testes para avaliar o novo procedimento, cujos resultados se mostraram bastante satisfatórios. O uso do banho ultrassônico apresentou desempenho superior aos métodos convencionais, destacando-se tanto pela maior eficiência quanto pelo melhor controle da contaminação. Dessa forma, foi adotado como principal técnica para a homogeneização dos reagentes. A escolha foi confirmada por meio de ensaios de uniformidade das amostras e pela análise das propriedades finais dos materiais, as quais comprovaram a eficácia do processo.

2.1.3 Pesagem e Compactação do Material

A pesagem e a compactação constituem etapas fundamentais na preparação das amostras, garantindo a uniformidade e a integridade do material ao longo de todo o processo. A pesagem precisa é essencial para assegurar que cada componente seja utilizado na quantidade correta, contribuindo para a consistência e a reprodutibilidade dos resultados, sendo realizada com balança de alta precisão. A Figura 2 apresenta a prensa hidráulica utilizada no processo de compactação das pastilhas, evidenciando o equipamento empregado na aplicação das cargas.

Figura 2 – Compactação das Amostras.



Fonte: Autoria própria, 2025.

A compactação foi realizada por prensagem uniaxial a frio utilizando uma prensa hidráulica, aplicada de forma controlada para reduzir a porosidade e aumentar a densificação das amostras. O procedimento ocorreu em duas etapas: inicialmente, aplicou-se uma pressão de 1,5 toneladas por 15 minutos, seguida de uma segunda etapa com 3 toneladas pelo mesmo tempo. Essa aplicação gradual de pressão garante a formação de uma estrutura mais robusta, evitando falhas mecânicas como trincas ou deformações, e promove uma homogeneidade estrutural adequada. O controle

rigoroso de pressão e tempo é determinante para otimizar as propriedades mecânicas e a integridade das amostras, conforme relatado por DOS SANTOS et al. (2014).

2.1.4 Sinterização das Amostras

A sinterização das amostras de óxido de zinco foi realizada em forno de alta temperatura com controle preciso, atingindo 1200 °C, condição adequada para a transição para a estrutura de Wurtzita e formação da microestrutura desejada. Essa transformação melhora propriedades como dureza, resistência mecânica e estabilidade térmica, garantindo um material denso e estável, conforme Lima e Vieira e Kumar et al. (2020). A Figura 3 ilustra o processo de sinterização no forno mufla.

Figura 3 – Sinterização das Amostras.

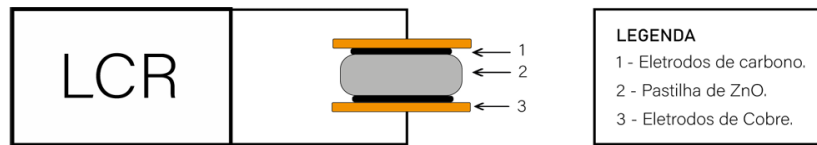


Fonte: Autoria própria, 2025.

2.2 Medição das Amostras

As propriedades elétricas das amostras foram avaliadas utilizando um medidor de ponte LCR, equipamento preciso e versátil. A partir das medições realizadas com a ponte LCR, foi possível extrair parâmetros elétricos fundamentais das amostras, como a condutividade elétrica (σ), a resistividade (ρ) e a permissividade dielétrica (ϵ). Esses valores foram calculados com base nos resultados experimentais de resistência e capacitância, possibilitando compreender o comportamento elétrico intrínseco dos materiais e os efeitos provocados pela dopagem com óxido de níquel (NiO). Para minimizar interferências externas, como ruídos elétricos e variações térmicas, o sistema experimental foi isolado com blocos de gesso, garantindo um ambiente estável. A Figura 4 apresenta o diagrama esquemático do arranjo experimental, ilustrando o layout do setup utilizado durante as medições.

Figura 4 – Esquema do layout experimental.



Fonte: Autoria própria, 2025.

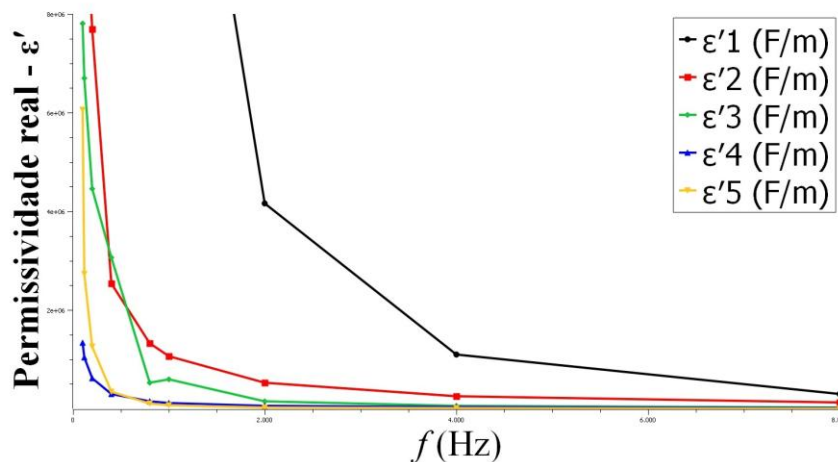
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos a partir das medições elétricas realizadas nas amostras de ZnO puro e dopado com diferentes teores de NiO. As análises foram conduzidas em função da frequência, com o objetivo de compreender a influência da dopagem e do processamento cerâmico sobre as propriedades dielétricas e condutivas do material.

3.1 Permissividade Real ($\epsilon' \times f$)

O gráfico da Figura 5 mostra que todas as amostras apresentam uma forte diminuição de ϵ' com o aumento da frequência, comportamento típico de materiais dielétricos policristalinos. Esse decaimento é atribuído à polarização interfacial (do tipo Maxwell–Wagner) e à polarização dipolar, que são dominantes em baixas frequências e perdem eficiência em altas frequências devido à incapacidade das cargas de acompanhar o campo alternado. A Figura 5 representa o gráfico da permissividade real comparada entre todas as amostras.

Figura 5 – Gráfico da Permissividade Real.



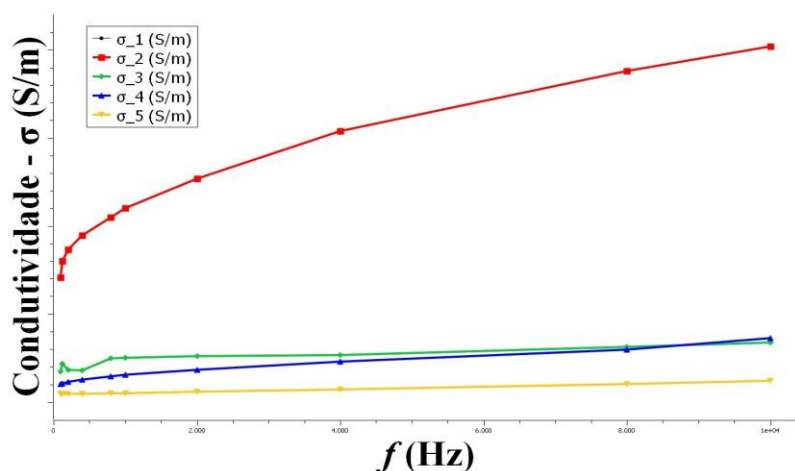
Fonte: Autoria própria, 2025.

A amostra 1 (ZnO sem dopagem e sem peneiração/aglutinante) apresenta valores anormalmente altos de permissividade, provavelmente devido à maior heterogeneidade microestrutural, com porosidades e aglomerações que aumentam o acúmulo de cargas nas interfaces. A partir da amostra 2, que passou pelo processo de peneiração e uso de aglutinante, observa-se uma redução drástica e estabilização da ϵ' , indicando uma microestrutura mais homogênea e compacta. Já as amostras dopadas (3 a 5) mantêm valores menores e mais estáveis de ϵ' , mostrando que a adição de NiO reduz a polarização interfacial, possivelmente pela substituição parcial de Zn^{2+} por Ni^{2+} e consequente diminuição dos defeitos de vacância de oxigênio.

3.2 Condutividade elétrica ($\sigma \times f$)

A condutividade cresce com o aumento da frequência em todas as amostras, o que é esperado para semicondutores do tipo ZnO. Esse aumento ocorre porque a condução alternada é favorecida pela movimentação localizada de portadores de carga (mecanismo hopping), que é mais eficiente em altas frequências. Abaixo encontra-se a Figura 6 que ilustra o gráfico comparativo da condutividade.

Figura 6 – Gráfico da Condutividade.



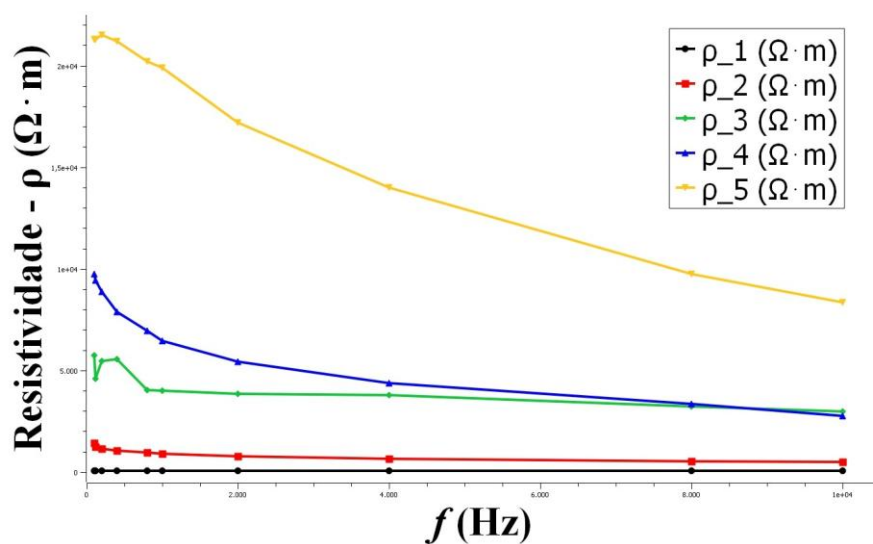
Fonte: Autoria própria, 2025.

A amostra 1 exibe condutividade extremamente elevada, destoando das demais, comportamento explicado pela ausência de peneiração e aglutinante, que resulta em baixa densificação, microtrincas e caminhos preferenciais de condução, tornando sua resposta mais condutiva, porém menos controlada. A amostra 2 (ZnO puro processado) apresenta o melhor desempenho dielétrico e condutivo equilibrado, com condutividade moderada e resposta coerente com a estrutura compacta. Já o acréscimo de NiO nas amostras 3 a 5 tende a reduzir ligeiramente a condutividade, sugerindo que o NiO atua como centro de armadilha de cargas, dificultando a condução eletrônica entre os grãos de ZnO, o que está de acordo com o comportamento esperado para dopagens de baixa concentração, que estabilizam o material sem conferir caráter metálico.

3.3 Resistividade elétrica ($\rho \times f$)

Os valores de resistividade apresentam a tendência inversa da condutividade, diminuindo com o aumento da frequência, característica de materiais onde a resposta resistiva é dominada por processos intergranulares. A Figura 7 mostra a variação da resistividade em função da frequência para todas as amostras, evidenciando as diferenças decorrentes da dopagem e do processamento.

Figura 7 – Gráfico da Resistividade.



Fonte: Autoria própria, 2025.

A amostra 5 (1,5% NiO) apresenta os maiores valores de resistividade (ρ), indicando que a dopagem mais alta aumenta a barreira de potencial nos contornos de grão, restringindo a condução eletrônica. A amostra 1 mantém a resistividade mais baixa, coerente com sua alta condutividade, reforçando que o processamento inadequado gerou condutividade parasita devido a poros e ligações fracas entre partículas. As amostras 2 a 4 apresentam valores intermediários e crescentes gradualmente, evidenciando que o aumento da dopagem com NiO modifica progressivamente o mecanismo de condução, passando de um comportamento predominantemente eletrônico para um regime mais limitado por barreiras interfaciais.

4. CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados evidenciaram que as amostras de ZnO e ZnO–NiO exibem comportamento característico de semicondutores cerâmicos policristalinos, com baixa condutividade e elevada resistividade, especialmente nas composições dopadas. Essa resposta indica que o material, nas

condições de síntese e sinterização empregadas, não é adequado para aplicações em células fotovoltaicas, que requerem maior transporte de portadores e menor barreira intergranular para otimizar a conversão de energia.

Por outro lado, a presença de forte polarização interfacial e estabilidade dielétrica sugere que o sistema ZnO–NiO apresenta potencial promissor em aplicações alternativas, como sensores de gás, varistores, componentes de isolamento elétrico e dispositivos dielétricos, onde a elevada resistividade e o controle de condução entre grãos são propriedades desejáveis para o funcionamento estável e eficiente.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força durante a pesquisa, à FAPEMA pelo apoio via bolsa PIBIT/IFMA, ao orientador pelas orientações e incentivo, e aos colegas do laboratório pela colaboração e troca de experiências que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- MORKOÇ, H.; ÖZGÜR, Ü. *Zinc Oxide: Fundamentals, Materials and Device Technology*. 1. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- SILVA, T. A.; PEREIRA, R. F.; MENDONÇA FILHO, J. G. Influência da distribuição de tamanho de partículas na densificação de massas cerâmicas. *Cerâmica Industrial*, v. 19, n. 3, p. 29–33, 2014.
- SILVA, H. V. S. P. *Cerâmicas multifuncionais de óxido de zinco dopadas com cobalto: propriedades ópticas, dielétricas e magnéticas*. 2019. Tese (Doutorado em Física) – Instituto de Física, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.
- CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- VAN VLACK, L. H. *Princípios de Ciência dos Materiais*. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.
- BONANOS, Nikolaos; PISSIS, Polycarpos; MACDONALD, J. Ross. Impedance Spectroscopy of Dielectrics and Electronic Conductors. In: KAUFMANN, Elton N. (Ed.). *Characterization of Materials*. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 2013. p. 1–14.