

Nano-CuFe₂O₄ sintetizadas a partir de tapioca

Érica K. A. de Lima^{1,2}, Pedro A. A. de Sousa², Geovana Tayná S. de Moraes², Aluska do N. S. Braga³,
Nílson F. Santos⁴ e Valdeci B. Santos²

¹Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos-SP, Brasil, (erica.lima@estudante.ufscar.br)

²Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina-PI, Brasil

³Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande – PB, Brasil

⁴Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão - SE, Brasil

Resumo: Este estudo avaliou a síntese sustentável de nanopartículas de ferrita de cobre (CuFe₂O₄) utilizando tapioca como agente quelante natural (proporções 1:1 e 2:1). Análises de DRX e FTIR confirmaram a fase espinela com alta cristalinidade (93%) e cristaltos de 48 nm. O MEV revelou partículas poliédricas aglomeradas. Os resultados comprovam que a tapioca é uma alternativa ecológica, de baixo custo e eficiente para a produção de nanomateriais com potencial tecnológico.

Palavras-chave: ferrita de cobre; síntese verde; teor de tapioca; propriedade estrutural e microestrutural.

INTRODUÇÃO

As ferritas de cobre (CuFe₂O₄) são cerâmicos com importantes propriedades magnéticas, condutividade térmica, e estabilidade térmica, usadas em diversas aplicações tecnológicas (eletrônica, meio ambiente e biomedicina) (Lang *et al.*, 2026; Cardoso *et al.*, 2025; El Messaoudi *et al.*, 2025). Possuem estrutura cristalina do tipo espinélio (AB₂O₄), com íons Cu²⁺ e Fe³⁺ distribuídos em sítios tetraédricos e octaédricos, influenciando suas propriedades (Figura 1).

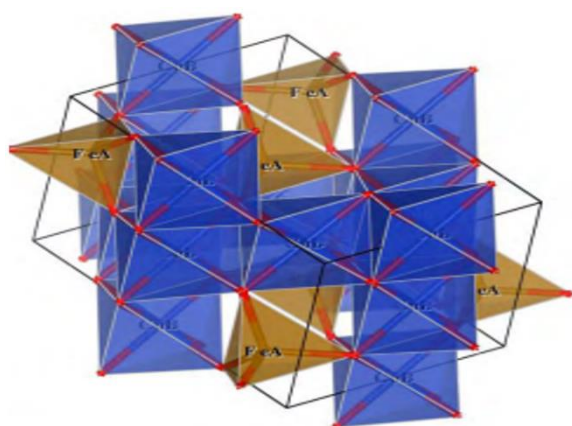


Figura 1: Representação do CuFe₂O₄ com configuração cristalina tetragonal.

Fonte: Andrade, 2012.

Essa organização estrutural confere ao material comportamento ferrimagnético, caracterizado pelo alinhamento antiparalelo dos momentos magnéticos nos sítios A e B, porém com magnitudes distintas, resultando em magnetização líquida diferente de zero. Como consequência, o CuFe₂O₄ apresenta resposta significativa a campos magnéticos externos, o que amplia seu potencial em aplicações tecnológicas (Awad e Zhitomirsky, 2024; Callister e Rethwisch *et al.*, 2018).

Além disso, essa configuração estrutural está associada a elevada densidade, estabilidade e anisotropia magnética, podendo ser ajustada pelas condições de síntese. Por essas características, CuFe₂O₄ é um material versátil e amplamente estudado (El Messaoudi *et al.*, 2025; Kumar *et al.*, 2025).

Para a obtenção dessas ferritas, o método de síntese sol-gel é amplamente usado devido ao controle da composição química e da estrutura cristalina, bem como a simplicidade do processo, eficiência, baixo consumo de energia, e alta pureza do produto final (Mazurenko *et al.*, 2025; Zate *et al.*, 2020). O tamanho das partículas depende da temperatura, da taxa de evaporação e do agente quelante, permitindo obter nanomateriais com propriedades controladas (El Messaoudi *et al.*, 2025).

Visando uma abordagem mais sustentável, a síntese verde tem como objetivo produzir materiais de maneira ecologicamente correta, utilizando recursos

naturais e menos agressivos ao meio ambiente (SHEENA *et al.*, 2026; CARDOSO *et al.*, 2025). Nesse contexto, a tapioca (amido de mandioca) (Figura 2) surge como uma alternativa promissora devido à sua abundância no Brasil, baixo custo e afinidade com íons metálicos, funcionando como agente quelante natural. Seu uso permite uma síntese mais ecológica, reduzindo o impacto ambiental e o custo final do produto, e mantendo o controle sobre a formação e propriedades das nanopartículas (De Almeida *et al.*, 2020).



Figura 2: Amido de mandioca (tapioca).

Fonte: Carvalho, 2022.

Apesar das vantagens dessa abordagem, a partir de plataformas de periódicos (Tabela 1), não foram encontrados resultados sobre nanopartículas de CuFe_2O_4 sintetizadas pelo método sol-gel modificado por tapioca, até o presente momento. Desta forma, este trabalho teve por objetivo cooperar para a produção sustentável de nanopartículas de CuFe_2O_4 através da síntese sol-gel modificado usando tapioca. O efeito deste agente quelante natural, e das propriedades estruturais e microestruturais foram avaliados.

Tabela 1. Resultados das buscas de anterioridades de artigos até 31 de abril de 2026.

PALAVRAS-CHAVE	ARTIGOS	
	SCOPUS	WEB OF SCINECE
<i>Cassava starch and sol gel</i>	22	21
<i>Cassava starch and sol gel and tapioca</i>	4	4
<i>Cassava starch and sol gel and tapioca and CuFe_2O_4 nanoparticles</i>	0	0

MATERIAL E MÉTODOS

Como materiais de partidas para a preparação das nanopartículas de CuFe_2O_4 , foram utilizados os reagentes químicos, Nitrato de Ferro nonahidratado ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) e Nitrato de Cobre trihidratado ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), ambos de alta pureza. Amido de mandioca (tapioca) de origem comercial, foi utilizada como agente quelante.

Para a síntese foram usadas razões de Tapioca: Metal na proporção de 1:1 e 2:1. Primeiramente, iniciou-se o processo de gelificação da tapioca sob agitação mecânica e temperatura. Em seguida, soluções de íons metálicos de cobre e ferro foram adicionados à solução precursora. A mistura obtida foi então seca, seguida por maceração e posterior calcinação por $900^\circ\text{C}/4\text{h}$. Por fim, o pó calcinado passou por nova maceração e peneiramento, obtendo-se o produto final. A Figura 3 mostra um resumo da preparação da ferrita de cobre.

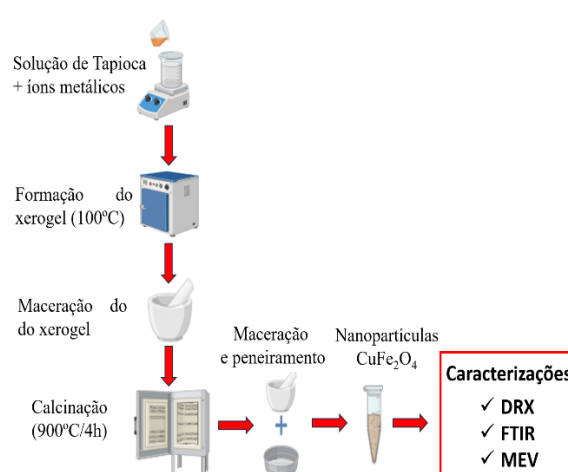


Figura 3. Fluxograma geral da produção da CuFe_2O_4 .

Nesse trabalho a Difração de raios X (DRX) foi utilizada para caracterizar a estrutura cristalina dos pós de CuFe_2O_4 , assim como estimar o tamanho de cristalito e taxa de cristalinidade. Foi usado um difratômetro de raios X (Shimadzu XRD-6000), com velocidade de varredura de $2^\circ/\text{min}$, ângulo $2\theta = 5^\circ$ a 80° , tensão de 40 KV, e com corrente de 30 mA. O software HighScore em conjunto ao banco de dados cristalográficos do JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) foram utilizados para a identificação das fases cristalinas presentes na amostra. O cálculo do tamanho do cristalito foi baseado na "Equação de Scherrer" (1) (Ghobashy *et al.*, 2024), usando o pico de difração de maior intensidade (100 %).

$$D = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos(\theta)} \quad (1)$$

Onde D é o tamanho do cristalito (nm); $k = 0,91$ é a constante de Scherrer; $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ é o comprimento de onda dos raios-X; β é a largura à meia altura do pico de difração (em radianos); e θ é o ângulo de difração. Para o cálculo de taxa de cristalinidade (Du *et al.*, 2024), foi utilizada a Equação (2):

$$Xc = \frac{\sum Ic}{\sum (Ic + Ia)} \times 100 \quad (2)$$

Sendo, Xc igual a taxa de cristalinidade (%); Ic correspondendo à soma das intensidades integradas dos picos de difração das fases cristalinas; e Ia é a intensidade integrada da dispersão amorfa.

A análise de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi realizada com o objetivo de identificar e avaliar os grupos funcionais presentes nos materiais estudados. Para isso, as amostras foram preparadas na forma de pastilhas contendo brometo de potássio (KBr), utilizado como matriz para dispersão do material e aumento da transmitância do feixe de radiação. As medições foram conduzidas em um espectrômetro modelo IRSpirit (Shimadzu), operando no modo de transmitância, na faixa espectral de 400 a 4000 cm^{-1} .

A morfologia superficial do nanopó de ferrita de cobre foi analisada através de microscópio eletrônico de varredura (MEV, marca TESCAN – MIRA3 LMH). A metalização da amostra ocorreu com deposição de ouro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta os difratogramas de raios X das amostras de CuFe_2O_4 calcinadas a 900 °C por 4 h, para as proporções 1:1 e 2:1 (agente quelante: íons metálicos). Observa-se a presença de picos, correspondentes às reflexões das redes cristalinas características do material. Os resultados indicam a formação predominante da fase tetragonal de CuFe_2O_4 , conforme a ficha cristalográfica JCPDS n° 034-0425. Além disso, como fase secundária apenas o CuO (óxido de cobre, JCPDS n° 1-072-0629) foi formado. A presença desse segundo composto também foi observada em outros trabalhos tais como o de Siqueira *et al.* (2026), Cui *et al.* (2022) que produziram ferrita de cobre sob parâmetros semelhantes.

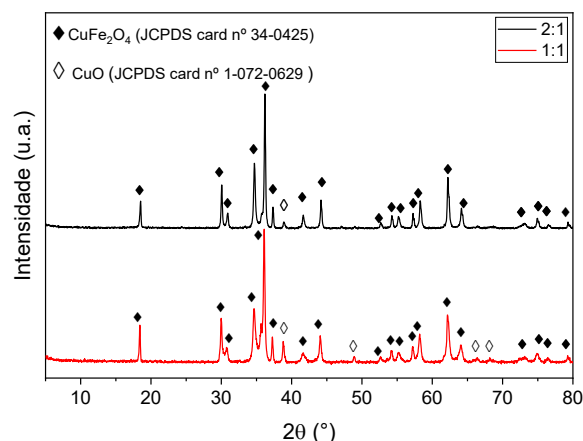
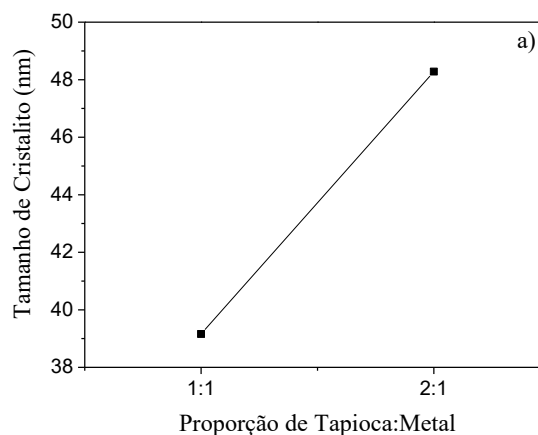


Figura 4. DRX das nanopartículas de CuFe_2O_4 .

É possível observar picos cristalinos bem mais definidos na curva referente à amostra de 2:1, com diminuição da quantidade e intensidade de picos que representam as segundas fases (CuO), indicando que houve um aumento no controle e na estabilização íons metálicos dentro da estrutura, assim como na cristalinidade do material.

A Figura 5 (a, b) mostra que com o aumento da concentração de agente quelante (Tapioca), é possível observar diferença considerável nos tamanhos de cristalitos (39,2 nm e 48,3 nm, respectivamente, proporção 1:1 e 2:1), assim como nas taxas de cristalinidade (85,5% - proporção 1:1 e 93,1% - proporção 2:1).



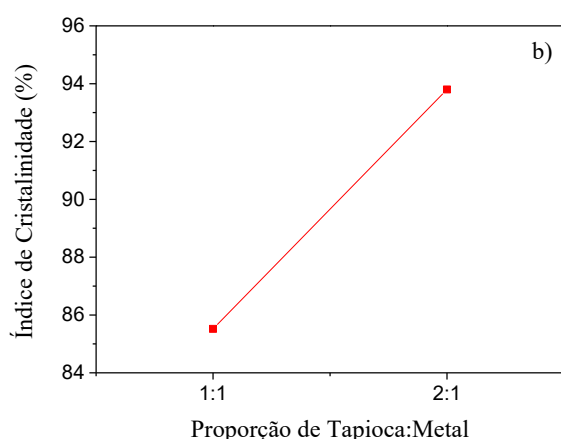


Figura 5. a) Tamanho de cristalito; b) Taxa de cristalinidade das amostras de CuFe_2O_4 .

Pode-se atribuir essas diferenças a quantidade de agente quelante dentro do processo, tendo em vista que ambas amostras foram submetidas aos mesmos parâmetros de calcinação, corroborando que a função do agente quelante é controlar e estabilizar os íons metálicos permitindo um controle refinado durante a síntese (El Messaoudi *et al.* 2025; De Almeida *et al.*, 2020).

Nota-se a proficiência do amido de mandioca como substituto do reagente de grau analítico, em comparação com o extrato da folha *Morus alba L.* usado para a síntese verde de nanopartículas de CuFe_2O_4 com valores de tamanho de cristalito de 20-40 nm (Cahyana *et al.*, 2021). Da mesma forma, com o estudo de Yadav *et al.* (2017), que gerou nanopartículas de CuFe_2O_4 com tamanho de cristalito de 43 nm, utilizando glicose e frutose, ou seja, mel.

A Figura 6 apresenta os espectros de FTIR das amostras de CuFe_2O_4 calcinadas, para as proporções 1:1 e 2:1 (agente quelante: íons metálicos). Nos espectros, as bandas entre 400 e 600 cm^{-1} , são atribuídas às vibrações de estiramento das ligações metal-oxigênio (M-O), que são características da estrutura espinela (Kumar *et al.*, 2025; Nikam *et al.*, 2024). As amostras com proporção 1:1 e 2:1, apresentam uma banda absorção predominante em 528,53 cm^{-1} e 577,36 cm^{-1} , respectivamente. São bandas associadas às ligações Fe-O e Cu-O nos sítios tetraédricos presentes na estrutura espinela da ferrita de cobre (Ramadan e El-masry, 2023). Na banda em torno de ~400 cm^{-1} é tipicamente atribuída às vibrações de alongamento dos cátions metálicos que ocupam sítios octaédricos. Estes resultados corroboram com aqueles obtidos por DRX (Figura 4).

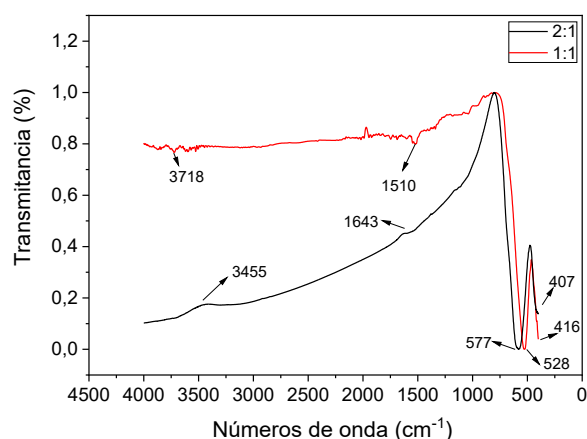


Figura 6. FTIR das nanopartículas de CuFe_2O_4 .

Em relação ao deslocamento para frequências mais elevadas na formulação com maior quantidade de agente quelante (2:1), pode ser atribuído à formação de uma rede cristalina mais ordenada e compacta, fruto de uma complexação mais eficaz dos íons metálicos pela tapioca durante o processo sol-gel (Rotjanasuworapong *et al.*, 2021).

Além das bandas citadas, há também bandas secundárias em torno de 3500-4000 cm^{-1} , relacionadas às vibrações de estiramento da ligação O-H, indicando a presença de água adsorvida ou hidroxilas superficiais. As bandas de ~1510 e 1630 cm^{-1} , referem-se à vibração angular da molécula de H_2O (Goli *et al.*, 2025).

Na análise morfológica (Figura 7) das nanopartículas de ferrita de cobre (proporção 2:1) calcinada à 900°C, é observado partículas em estado aglomerado, possivelmente pela natureza magnética das mesmas, além de morfologia poliédrica (Kiani *et al.*, 2022).

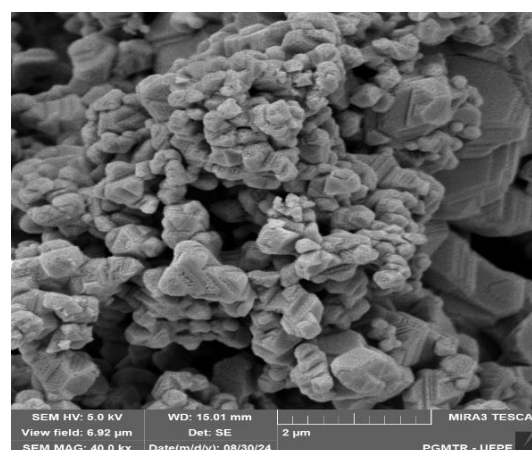


Figura 7. MEV das nanopartículas de CuFe_2O_4 .

CONCLUSÃO

Os resultados de DRX confirmaram a formação predominante da fase tetragonal característica do material, com menor presença de fases secundárias na



proporção 2:1, evidenciando maior controle na estabilização dos íons metálicos. Observou-se que a razão mais elevada de agente quelante (2:1) proporcionou aumento na cristalinidade (93,1%) e no tamanho de cristalito (48,3 nm), em comparação à razão 1:1.

As análises de FTIR confirmaram a presença das ligações metal-oxigênio típicas da estrutura espinela, com deslocamento das bandas para frequências mais altas na formulação com maior teor de tapioca, indicando uma rede cristalina mais ordenada. A morfologia observada por MEV revelou partículas poliédricas com tendência ao aglomeramento, comum em materiais com características magnéticas.

Dessa forma, este trabalho evidencia o potencial do uso da tapioca como alternativa sustentável e de baixo custo na síntese de ferritas, contribuindo para o desenvolvimento de processos mais ecológicos e alinhados com os princípios da química verde. Além disso, os resultados obtidos abrem caminho para futuras aplicações das nanopartículas de CuFe_2O_4 em diferentes áreas tecnológicas, incluindo eletrônica, catálise e sistemas de armazenamento de energia.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBIT) da Universidade Federal do Piauí. A infraestrutura utilizada na Central Multiusuário do Departamento de Física, Central Analítica do Departamento de Química Fundamental, e da Pós-Graduação em Ciências de Materiais, todos da Universidade Federal de Pernambuco.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Jefferson Maul. **Ferritas de cobre e zinco do tipo espinélio sintetizadas pelos métodos: hidrotérmico assistido por micro-ondas, precursores poliméricos, reação de estado sólido e decomposição térmica**. Tese de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2012.

AWAD, Mahmoud; ZHITOMIRSKY, Igor. Magnetic CuFe_2O_4 spinel-polypyrrole pseudocapacitive composites for energy storage. **Materials**, v. 17, n. 21, p. 5249, 2024.

CAHYANA, Antonius Herry *et al.* Green synthesis of CuFe_2O_4 nanoparticles mediated by *Morus alba* L. leaf extract: crystal structure, grain morphology, particle size, magnetic and catalytic properties in Mannich reaction. **Ceramics International**, v. 47, n. 15, p. 21373-21380, 2021.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, David. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, v. 9, 2018.

CARDOSO, Beatriz *et al.* Green synthesis of copper ferrite-based nanofluids using *Chlorella vulgaris* for heat transfer enhancement. **Journal of Molecular Liquids**, v. 428, p. 127498, 2025.

CARVALHO, T. Tapioca-mandioca. **Clinica de Nutrição**, 2022. Disponível em: <https://www.nutricionistaesportiva.com/como-fazer-tapioca/farinha-e-mandioca/>. Acesso em: 31 de março de 2026.

CHALA, Sinaporn *et al.* Enhanced visible-light-response photocatalytic degradation of methylene blue on Fe-loaded BiVO_4 photocatalyst. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 597, p. 129-135, 2014.

CUI, Kai *et al.* Facile solid-state synthesis of tetragonal CuFe_2O_4 spinels with improved infrared radiation performance. **Ceramics International**, v. 48, n. 8, p. 10555-10561, 2022.

DE ALMEIDA, Willians Lopes *et al.* Environmentally friendly and low-cost synthesis of ZnO nanopowders by tapioca-assisted sol-gel route. **Ceramics International**, v. 46, n. 8, p. 10835-10842, 2020.

DU, Jiawei *et al.* Synthesis and characterization of absorption-enhanced alumina solid particle materials for direct irradiation solar-thermal conversion. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 272, p. 112853, 2024.

EL MESSAOUDI, Nouredine *et al.* Green synthesis of CuFe_2O_4 nanoparticles from bioresource extracts and their applications in different areas: a review. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 15, n. 1, p. 99-120, 2025.

GHOBASHY, Mohamed Mohamady *et al.* Investigating the impact of electron beam irradiation on electrical, magnetic, and optical properties of $\text{XLPE}/\text{Co}_3\text{O}_4$ nanocomposites. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 4829, 2024.

KIANI, Azin; DAVAR, Fatemeh; BAZARGANIPOUR, Mehdi. Influence of verjuice extract on the morphology, phase, and magnetic properties of green synthesized CoFe_2O_4 nanoparticle: its application as an anticancer drug delivery. **Ceramics International**, v. 48, n. 23, p. 34895-34906, 2022.

KUMAR, Nitish *et al.* CuFe_2O_4 nanoparticles as a potential electrode material for asymmetric supercapacitor applications. **Journal of Power Sources**, v. 642, p. 236-960, 2025.

LANG, Qiujin; FENG, Rui; SHI, Buyin. Facile calcination-free synthesis of magnetically separable nano- CuFe_2O_4 : Activating peroxydisulfate to degrade organic contaminants. **Journal of Water Process Engineering**, v. 82, p. 109465, 2026.



MAHHOUTI, Z. *et al.* Structural and magnetic properties of $\text{Co}_{0.7}\text{Ni}_{0.3}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles synthesized by sol-gel method. **Applied Physics A**, v. 122, n. 7, p. 651, 2016.

MAZURENKO, Julia *et al.* Synthesis and characterization of copper ferrite nanoparticles for efficient photocatalytic degradation of organic dyes. **Journal of Nanotechnology**, v. 2025, n. 1, p. 8899491, 2025.

NIKAM, Prashant N. *et al.* Synthesis and characterization of CuFe_2O_4 spinel ferrite for supercapacitor application. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 101, n. 10, p. 101277, 2024.

RAMADAN, Rania; EL-MASRY, Mai M. Effect of (Co and Zn) doping on structural, characterization and the heavy metal removal efficiency of CuFe_2O_4 nanoparticles. **Journal of the Australian Ceramic Society**, v. 60, n. 2, p. 509-524, 2024.

ROTJANASUWORAPONG, Kornkanok; LERDWIJITJARUD, Wanchai; SIRIVAT, Anuvat. Synthesis and characterization of $\text{Fe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite nanoparticle with high saturation magnetization via the surfactant assisted co-precipitation. **Nanomaterials**, v. 11, n. 4, p. 876, 2021.

SHEENA, T. V.; JYOTHISH, B.; JACOB, John. Green synthesis and characterization of nanocrystalline Ni-Co spinel ferrites using Vitex negundo leaf extract for biomedical applications. **Next Materials**, v. 11, p. 101717, 2026.

SIQUEIRA, Cássio *et al.* CuFe_2O_4 nanoparticles via thermal decomposition as recyclable magnetic catalysts for perimidine synthesis. **Scientific Reports**, 2025.

YADAV, Raghvendra Singh *et al.* Structural, dielectric, electrical and magnetic properties of CuFe_2O_4 nanoparticles synthesized by honey mediated sol-gel combustion method and annealing effect. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 28, n. 8, p. 6245-6261, 2017.

ZATE, M. K. *et al.* Ferrite nanostructures: Synthesis methods. In: Spinel ferrite nanostructures for energy storage devices. **Elsevier**, 2020. P. 13-34.