**NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE FERRO (Fe₃O₄) PARA HIPERTERMIA MAGNÉTICA NO TRATAMENTO DO CÂNCER**

Elisabete Soares de Santana¹

Maiane Silva Barbosa de Moraes2

Thallys Mendes da Silva3

Victor Hugo da Silva4

Beatriz de Paula Alencar55

Emely Regina Messias6

Dário César de Oliveira Conceição7

**RESUMO:**

**Introdução:** As nanopartículas de óxido de ferro (Fe₃O₄) têm ganhado destaque na oncologia devido ao seu potencial no tratamento do câncer por meio da hipertermia magnética. Esse método utiliza um campo magnético alternado para gerar calor local, elevando a temperatura das nanopartículas inseridas no tecido tumoral e destruindo as células cancerígenas sem afetar os tecidos saudáveis circundantes. As propriedades magnéticas e a biocompatibilidade dessas nanopartículas, além de sua funcionalização com ligantes específicos, contribuem para sua eficácia no direcionamento a tumores. **Objetivos:** Avaliar a eficácia das nanopartículas de óxido de ferro (Fe₃O₄) na hipertermia magnética como tratamento complementar ao câncer, explorando sua capacidade de gerar calor controlado e sua combinação com outras modalidades terapêuticas. **Metodologia:** Foi realizada uma revisão sistemática da literatura utilizando os descritores "Hipertermia Magnética", "Nanopartículas" e "Tratamento do Câncer" em bases de dados como SciELO, Medline e Lilacs. O operador booleano "*AND*" foi utilizado para refinar a busca. Foram incluídos estudos publicados entre 2020 e 2024 que abordaram o uso de nanopartículas de Fe₃O₄. No total, 12 artigos foram selecionados para análise. **Resultados e Discussões:** Os estudos mostram que as nanopartículas de Fe₃O₄ são eficazes na geração de calor em tecidos tumorais, apresentando baixa toxicidade quando funcionalizadas adequadamente. A combinação da hipertermia magnética com quimioterapia ou radioterapia tem demonstrado potencial para aumentar a eficácia do tratamento. Além disso, o uso de modelagem computacional e técnicas de imagem médica pode aprimorar o monitoramento e a precisão do tratamento, garantindo uma distribuição uniforme do calor. **Considerações Finais:** As nanopartículas de óxido de ferro (Fe₃O₄) para hipertermia magnética representam uma abordagem promissora para o tratamento do câncer, oferecendo uma alternativa menos invasiva e com menor impacto nos tecidos saudáveis. No entanto, desafios como a otimização da distribuição das partículas e a avaliação da segurança a longo prazo ainda precisam ser abordados. O avanço nas áreas de nanotecnologia e biomedicina pode consolidar essa técnica como uma terapia complementar importante no combate ao câncer.

**Palavras-Chave:** Hipertermia Magnética, Nanopartículas, Tratamento do Câncer.

**Área Temática:** Ciências da Saúde.

**E-mail do autor principal:** elisabetesoares0987@gmail.com.

1Farmácia, Faculdade Santíssima Trindade - FAST, Nazaré da Mata - Pernambuco, elisabetesoares0987@gmail.com.

2Farmacêutica, Mestranda em Ciência de Materiais, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, Pernambuco, maiane.bmoraes@ufpe.br.

3Farmacêutico, Mestranda em Ciência de Materiais, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, Pernambuco, thallys.mendes@ufpe.br.

4Enfermagem, Faculdade Anhanguera de Maceió-AL, hugobrm26@gmail.com.

5Medicina, Centro Universitário de Mineiros-Campus Trindade UNIFIMES, biadepaulaalencar@academico.unifimes.edu.br.

6Medicina, Universidade Federal do Paraná (UFPR) - Toledo, Paraná, emelymessias@ufpr.br.

7Químico, Doutor em Ciência de Materiais, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, dario.cesar@ufpe.br.

**1. INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos, as nanopartículas de óxido de ferro (Fe₃O₄) têm atraído crescente atenção no campo da oncologia devido ao seu potencial para o tratamento do câncer por meio da hipertermia magnética. Esse método envolve a geração de calor local controlado, induzido pela aplicação de um campo magnético alternado, que eleva a temperatura das nanopartículas inseridas no tecido tumoral. Esse aquecimento controlado provoca a destruição seletiva das células cancerígenas sem danificar o tecido saudável ao redor. Esse mecanismo representa uma abordagem promissora e menos invasiva em comparação com as terapias convencionais, como a quimioterapia e a radioterapia (Alencar *et al*., 2020).

As propriedades magnéticas das nanopartículas de Fe₃O₄ são fundamentais para sua eficácia no tratamento. Essas partículas, quando expostas a um campo magnético externo, geram calor por meio de dois mecanismos principais: perdas por relaxamento de Néel e perdas por relaxamento de Brown. Ambos os mecanismos estão relacionados à dissipação de energia quando as nanopartículas são submetidas a um campo magnético oscilante. A alta eficiência na conversão de energia magnética em calor faz dessas nanopartículas uma ferramenta promissora para a hipertermia magnética, particularmente quando modificadas com agentes de revestimento biocompatíveis que melhoram sua estabilidade e biodistribuição (Apolinário *et al*., 2020).

Além disso, as nanopartículas de óxido de ferro possuem excelente biocompatibilidade e podem ser funcionalizadas com ligantes específicos que aumentam a seletividade para células cancerígenas. Estudos recentes mostram que o uso de revestimentos poliméricos, como o polietilenoglicol (PEG), melhora a circulação das nanopartículas no sistema sanguíneo e reduz a captação por células do sistema imunológico, prolongando o tempo de residência das partículas no corpo. Essa modificação também permite que as nanopartículas sejam direcionadas de maneira mais eficaz para os tumores, aumentando a precisão e a eficiência do tratamento (Bertuzzo *et al*., 2023).

Um aspecto crucial da aplicação clínica dessas nanopartículas é a segurança. Pesquisas demonstram que as nanopartículas de Fe₃O₄ têm baixa toxicidade in vivo, desde que sejam administradas em doses adequadas. No entanto, estudos sobre a toxicidade a longo prazo ainda são necessários para garantir a viabilidade desse tratamento em seres humanos, especialmente considerando a possibilidade de acúmulo das partículas em órgãos como o fígado e os rins. Assim, o desenvolvimento contínuo de metodologias para minimizar esses riscos é de extrema importância para o avanço da tecnologia (Cândido *et al*., 2022).

Por fim, a combinação da hipertermia magnética com outras modalidades terapêuticas, como a quimioterapia e a imunoterapia, tem mostrado resultados promissores. A sinergia entre esses tratamentos pode potencializar os efeitos antitumorais, uma vez que o aumento da temperatura induzida pela hipertermia pode facilitar a penetração de medicamentos nas células tumorais e estimular uma resposta imunológica mais robusta. Dessa forma, as nanopartículas de Fe₃O₄ não só têm o potencial de tratar diretamente os tumores por meio de calor, mas também de melhorar a eficácia de outros tratamentos (De Freitas *et al*., 2020).

O objetivo deste estudo é avaliar a eficácia das nanopartículas de óxido de ferro (Fe₃O₄) na aplicação de hipertermia magnética como tratamento complementar ao câncer, explorando sua capacidade de gerar calor controlado em tumores quando expostas a campos magnéticos alternados. O trabalho visa analisar os avanços recentes na funcionalização, citotoxicidade, distribuição das nanopartículas e na combinação com outras modalidades terapêuticas, além de investigar a possibilidade de integração com técnicas de imagem médica para maior precisão no tratamento.

**2. METODOLOGIA**

Realizou-se uma revisão sistemática da literatura utilizando os termos "Descritor em Ciências da Saúde (DeCS)": "Hipertermia Magnética"; "Nanopartículas"; "Tratamento do Câncer". As bases de dados consultadas foram *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), Medline e Lilacs. Utilizou-se o operador booleano "*AND*" para combinar os descritores e refinar a busca, a fim de localizar estudos que tratam do uso de nanopartículas de óxido de ferro (Fe₃O₄) na hipertermia magnética aplicada ao tratamento de câncer.

A seleção dos artigos seguiu critérios de inclusão e exclusão pré-definidos, priorizando pesquisas que investigam o desenvolvimento e a aplicação de sistemas de liberação controlada de fármacos baseados em nanopartículas para tratamentos oncológicos. Foram incluídos estudos que abordaram diretamente a temática proposta, com artigos completos publicados entre 2020 e 2024. Como critérios de exclusão, foram descartados artigos pagos, repetidos e aqueles sem relação explícita com a temática central.

No total, a busca inicial resultou em 95 artigos relevantes. Após a leitura criteriosa e aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, 12 artigos foram selecionados para análise detalhada. Esses estudos forneceram uma visão abrangente sobre os avanços recentes no uso de nanopartículas de óxido de ferro em terapias de câncer por hipertermia magnética, contribuindo com dados significativos para o entendimento dos mecanismos de ação, eficiência, limitações e potencialidades dessa tecnologia emergente.

**3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os resultados de estudos recentes sobre o uso de nanopartículas de óxido de ferro (Fe₃O₄) para hipertermia magnética no tratamento do câncer têm sido promissores. Uma das principais vantagens dessas nanopartículas é sua capacidade de gerar calor localmente quando expostas a um campo magnético alternado, elevando a temperatura de tecidos tumorais a níveis letais para as células cancerosas (42–45°C), sem prejudicar tecidos saudáveis . Essa técnica já demonstrou eficácia no tratamento de tumores sólidos, como o glioblastoma, que é o câncer de mama (Fernandes *et al*., 2021).

No entanto, a eficiência da terapia depende de fatores como a dispersão das nanopartículas no tumor e a intensidade do campo magnético aplicado. Ensaios in vitro e in vivo mostram que as nanopartículas de Fe₃O₄ podem ser funcionalizadas com agentes de direcionamento para aumentar sua acumulação em tumores, melhorando a eficiência do tratamento. Além disso, avanços na síntese dessas nanopartículas permitiram o desenvolvimento de partículas com tamanhos e formas mais controladas, otimizando sua resposta ao campo magnético (Ferreira *et al*., 2024).

A citotoxicidade dessas nanopartículas também tem sido um foco de estudo importante. Ensaios realizados por pesquisadores sugerem que, em concentrações adequadas, as nanopartículas de Fe₃O₄ apresentam baixa toxicidade e são bem toleradas pelo organismo, especialmente quando recobertas por materiais biocompatíveis como o polietilenoglicol (PEG) . Esse tipo de revestimento pode evitar a agregação das nanopartículas e melhorar sua estabilidade no corpo humano (Lavayen *et al*., 2021).

Resultados de estudos clínicos preliminares indicam que a combinação da hipertermia magnética com terapias convencionais, como a quimioterapia ou radioterapia, pode potencializar os efeitos anticancerígenos. O calor gerado pelas nanopartículas pode aumentar a permeabilidade das células tumorais, facilitando a entrada de fármacos e tornando-as mais sensíveis à radiação. Os estudos recentes também destacam a importância da dosagem e da distribuição homogênea das nanopartículas no tecido tumoral (Vieira et al., 2024).

Uma distribuição inadequada pode levar à formação de zonas de aquecimento desiguais, comprometendo a eficácia do tratamento. A modelagem computacional tem sido uma ferramenta crucial para prever a distribuição térmica durante o tratamento e otimizar os parâmetros da terapia (Vinícius Araújo et al., 2024). Em suma, os avanços na aplicação das nanopartículas de Fe₃O₄ para hipertermia magnética têm mostrado resultados encorajadores, embora ainda existam desafios a serem superados, como o controle preciso da dose e da distribuição das partículas no organismo. Estudos contínuos são necessários para refinar essa técnica e garantir sua eficácia e segurança em larga escala (Mamani *et al*., 2020).

Além dos avanços mencionados, novos estudos exploram o uso de nanopartículas de Fe₃O₄ combinadas com técnicas de imagem médica, como a ressonância magnética (MRI), para um tratamento mais preciso e controlado. As nanopartículas podem atuar como agentes de contraste, permitindo o monitoramento em tempo real da localização e distribuição das partículas no tumor. Essa abordagem "teranóstica", que combina diagnóstico e terapia, tem o potencial de melhorar significativamente a precisão da hipertermia magnética, garantindo uma distribuição uniforme do calor e minimizando danos a tecidos saudáveis ao redor (Shakir *et al*., 2020).

**4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A utilização de nanopartículas de óxido de ferro (Fe₃O₄) para hipertermia magnética no tratamento do câncer apresenta-se como uma abordagem promissora, especialmente para tumores de difícil acesso ou resistência a terapias convencionais. O controle preciso da temperatura gerada pelas nanopartículas sob campos magnéticos permite uma intervenção localizada, minimizando os danos aos tecidos saudáveis e oferecendo uma alternativa menos invasiva. Além disso, a possibilidade de funcionalizar essas nanopartículas com agentes terapêuticos ou ligantes específicos aumenta sua eficácia no direcionamento ao tecido tumoral, abrindo novas perspectivas no tratamento oncológico.

Entretanto, apesar dos avanços significativos, ainda existem desafios a serem superados, como a otimização da distribuição das nanopartículas no tumor e a minimização dos efeitos colaterais. Estudos adicionais são necessários para avaliar a segurança a longo prazo e melhorar a eficiência clínica desta abordagem. Com o contínuo progresso nas áreas de nanotecnologia e biomedicina, a hipertermia magnética mediada por nanopartículas de óxido de ferro tem o potencial de se consolidar como uma terapia complementar importante no combate ao câncer, oferecendo novas possibilidades para pacientes e profissionais de saúde.

**REFERÊNCIAS**

ALENCAR, ELLEN OLIVEIRA DE ASSIS; DE ARAÚJO, Ana Cláudia Vaz. Estudo estatístico para o uso de material nanoestruturado na remoção dos corantes Vermelho Congo e Índigo Carmim em meio aquoso. **Revista Geama**, v. 6, n. 3, p. 60-70, 2020.

APOLINÁRIO, Alexsandra Conceição *et al*. Abrindo a caixa de pandora dos nanomedicamentos: há realmente muito mais ‘espaço lá embaixo’. Química nova, v. 43, n. 2, p. 212-225, 2020.

BERTUZZO, Vinícius Lima; CARVALHO, Alberto Vieira de; SANTOS, Dayse Iara dos. Síntese Conjunta do compósito nanoestruturado Fe2O3-SnO2 pelo método poliol e seu desempenho fotocatalítico no descoramento da rodamina-B. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 28, n. 1, p. e20220180, 2023.

CÂNDIDO, Marcela Aparecida *et al*. Síntese de nanopartículas de óxido de ferro estabilizadas com citrato de sódio e TMAOH. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, p. e139111637698-e139111637698, 2022.

DE FREITAS, Camila Fabiano *et al*. LIPOSSOMAS DE LONGA-CIRCULAÇÃO COMO ESTRATÉGIA PROMISSORA PARA O TRANSPORTE E BIODISPONIBILIZAÇÃO DE FÁRMACOS NO TRATAMENTO DO CÂNCER. Uningá Review, v. 35, p. eRUR3400-eRUR3400, 2020.

FERNANDES, Sérgio Matos *et al*. Oxidação Fenton do azo corante Ponceau BS usando nanopartículas de óxido de ferro como catalisador. **Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, p. 899-916, 2021.

FERREIRA, Marcos A. *et al*. Síntese de Nanopartículas Magnéticas: O Potencial Multidisciplinar da Prática da Nanociência no Ensino Médio. **Revista Processos Químicos**, v. 18, n. 35, p. 91-99, 2024.

LAVAYEN, Vladimir *et al*. Síntese e caracterização de nanopartículas de óxido de ferro: Uma proposta de atividade experimental. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, p. e27310817184-e27310817184, 2021.

MAMANI, Javier Bustamante *et al*. Terapia de magneto-hipertermia no modelo de tumor de glioblastoma on-a-Chip. einstein (São Paulo), v. 18, p. eAO4954, 2020.

SHAKIR, Safa Waleed *et al*. CAPTURA MELHORADA DE DIÓXIDO DE CARBONO POR NANOFLUIDOS CONTENDO NANOPARTICULAS INORGÂNICAS E LÍQUIDO ORGÂNICO DE LIGAÇÃO. **Periódico Tchê Química**, v. 17, n. 36, 2020.

VIEIRA, Filipe Oliveira; DA ROCHA, Lizandra Viana Maurat; TAVARES, Maria Inês Bruno. Abordagens sustentáveis em nanocompósitos poliméricos reforçados por óxidos metálicos. Revista Sistemática, v. 14, n. 4, p. 1014-1048, 2024.

VINÍCIUS-ARAÚJO, Marcus; ROCHA, João Victor Ribeiro; BAKUZIS, Andris F. Nanopartículas Magnéticas à Base de Óxido de Ferro: Propriedades Magnéticas e Aplicações na Medicina. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 46, n. suppl. 1, p. e20240187, 2024.