RGe ISSN: 2177-3246

NANOMEDICINA E MEDICINA DE PRECISÃO: AVANÇOS E APLICAÇÕES DAS NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS NA SAÚDE CONTEMPORÂNEA

NANOMEDICINE AND PRECISION MEDICINE: ADVANCES AND APPLICATIONS OF MAGNETIC NANOPARTICLES IN CONTEMPORARY HEALTHCARE

NANOMEDICINA Y MEDICINA DE PRECISIÓN: AVANCES Y APLICACIONES DE LAS NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS EN LA SALUD CONTEMPORÁNEA

10.56238/revgeov17n6-120

Alex Gonçalves Feitosa
Doutorando em Bioquímica e Biologia Molecular
Instituição: Universidade Federal do Cariri (UFCA)
E-mail: alexfeitosaq@gmail.com

Jéssica Gonçalves Feitosa
Mestra em Enfermagem
Instituição: Universidade Regional do Cariri (URCA)
E-mail: Jessica.feitosa270193@gmail.com

Geamberg Einstein Cruz Macedo
Especialista em Cirurgia de Cabeça e Pescoço
Instituição: Universidade Federal do Cariri (UFCA)
E-mail: gcruzmacedonet@gmail.com

Guilherme da Costa Sampaio
Graduando em Medicina
Instituição: Universidade Regional do Cariri (URCA)
E-mail: guilhermedacostasampaio@hotmail.com

Maria Laís Martiniano Costa
Graduanda em Medicina
Instituição: Centro Universitário Vale do Salgado (UNIVS)
E-mail: laismartiniano4@gmail.com

Wladimir Albuquerque d'Alva Filho
Graduando em Medicina
Instituição: Universidade Regional do Cariri (URCA)
E-mail: wladimir.filho@urca.br

RGe
ISSN: 2177-3246

Luany do Amaral Ávalos
Pós-graduanda em Nutrologia
Instituição: Instituto CDT de Desenvolvimento em Ciências Médicas
E-mail: luanyavalos17@gmail.com

Tiago Lins Grangeiro
Graduando em Medicina
Instituição: Universidade Regional do Cariri (URCA)
E-mail: ttiagolins@hotmail.com

RESUMO
A nanomedicina tem promovido avanços significativos na saúde contemporânea ao integrar conhecimentos da nanotecnologia, bioengenharia, biologia molecular e medicina para o desenvolvimento de abordagens diagnósticas e terapêuticas mais eficientes e individualizadas. Entre os diferentes sistemas nanoestruturados investigados atualmente, as nanopartículas magnéticas destacam-se devido às propriedades superparamagnéticas, elevada área superficial, capacidade de funcionalização química e responsividade a campos magnéticos externos, permitindo aplicações em bioimagem, entrega direcionada de fármacos, hipertermia magnética, medicina regenerativa e sistemas teranósticos. Associada a esse cenário, a medicina de precisão vem consolidando um novo paradigma assistencial baseado na adaptação das estratégias clínicas às características biológicas e moleculares individuais dos pacientes. Diante desse contexto, o presente estudo objetivou analisar criticamente os avanços científicos relacionados às aplicações biomédicas das nanopartículas magnéticas no contexto da nanomedicina e medicina de precisão, discutindo suas potencialidades diagnósticas e terapêuticas, bem como os principais desafios para sua incorporação clínica. Trata-se de uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo-analítico, realizada nas bases PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science e Google Scholar, abrangendo publicações entre 2016 e 2026. Foram utilizados descritores em inglês combinados por operadores booleanos: (“nanomedicine” OR “magnetic nanoparticles” OR “precision medicine” OR “drug delivery” OR “hyperthermia” OR “theranostics” OR “magnetic resonance imaging”). Inicialmente foram identificados 73 estudos. Após remoção de duplicatas e aplicação dos critérios de elegibilidade, 26 artigos foram incluídos na síntese final. Os resultados evidenciaram que as nanopartículas magnéticas apresentam elevada versatilidade funcional e potencial translacional, embora limitações relacionadas à toxicidade, biodistribuição e validação clínica ainda representem desafios relevantes para sua consolidação nos sistemas de saúde.

Palavras-chave: Sistemas Nanoestruturados. Medicina Personalizada. Teranóstica. Bioimagem. Liberação Controlada de Fármacos.

ABSTRACT
Nanomedicine has promoted significant advances in contemporary healthcare by integrating knowledge from nanotechnology, bioengineering, molecular biology, and medicine to develop more efficient and individualized diagnostic and therapeutic approaches. Among the different nanostructured systems currently under investigation, magnetic nanoparticles stand out due to their superparamagnetic properties, high surface area, capacity for chemical functionalization, and responsiveness to external magnetic fields, enabling applications in bioimaging, targeted drug delivery, magnetic hyperthermia, regenerative medicine, and theranostic systems. Associated with this scenario, precision medicine has been consolidating a new healthcare paradigm based on adapting clinical

strategies to the individual biological and molecular characteristics of patients. In this context, the present study aimed to critically analyze scientific advances related to the biomedical applications of magnetic nanoparticles within the framework of nanomedicine and precision medicine, discussing their diagnostic and therapeutic potential as well as the main challenges for their clinical incorporation. This study consists of a narrative literature review with a qualitative approach and descriptive-analytical character, conducted using the PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases, covering publications from 2016 to 2026. English descriptors combined through Boolean operators were used: ("nanomedicine" OR "magnetic nanoparticles" OR "precision medicine" OR "drug delivery" OR "hyperthermia" OR "theranostics" OR "magnetic resonance imaging"). Initially, 73 studies were identified. After duplicate removal and application of eligibility criteria, 26 articles were included in the final synthesis. The results demonstrated that magnetic nanoparticles exhibit high functional versatility and translational potential, although limitations related to toxicity, biodistribution, and clinical validation still represent important challenges for their consolidation within healthcare systems.

Keywords: Nanostructured Systems. Personalized Medicine. Theranostics. Bioimaging. Controlled Drug Delivery.

RESUMEN

La nanomedicina ha promovido avances significativos en la salud contemporánea al integrar conocimientos de nanotecnología, bioingeniería, biología molecular y medicina para el desarrollo de enfoques diagnósticos y terapéuticos más eficientes e individualizados. Entre los diferentes sistemas nanoestructurados actualmente investigados, las nanopartículas magnéticas destacan debido a sus propiedades superparamagnéticas, elevada área superficial, capacidad de funcionalización química y respuesta a campos magnéticos externos, permitiendo aplicaciones en bioimagen, liberación dirigida de fármacos, hipertermia magnética, medicina regenerativa y sistemas teranósticos. Asociada a este escenario, la medicina de precisión ha consolidado un nuevo paradigma asistencial basado en la adaptación de las estrategias clínicas a las características biológicas y moleculares individuales de los pacientes. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar críticamente los avances científicos relacionados con las aplicaciones biomédicas de las nanopartículas magnéticas en el contexto de la nanomedicina y la medicina de precisión, discutiendo su potencial diagnóstico y terapéutico, así como los principales desafíos para su incorporación clínica. Se trata de una revisión narrativa de la literatura, con enfoque cualitativo y carácter descriptivo-analítico, realizada en las bases de datos PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science y Google Scholar, incluyendo publicaciones entre 2016 y 2026. Se utilizaron descriptores en inglés combinados mediante operadores booleanos: ("nanomedicine" OR "magnetic nanoparticles" OR "precision medicine" OR "drug delivery" OR "hyperthermia" OR "theranostics" OR "magnetic resonance imaging"). Inicialmente se identificaron 73 estudios. Tras la eliminación de duplicados y la aplicación de los criterios de elegibilidad, se incluyeron 26 artículos en la síntesis final. Los resultados evidenciaron que las nanopartículas magnéticas presentan elevada versatilidad funcional y potencial traslacional; sin embargo, las limitaciones relacionadas con la toxicidad, biodistribución y validación clínica aún representan desafíos relevantes para su consolidación en los sistemas de salud.

Palabras clave: Sistemas Nanoestructurados. Medicina Personalizada. Teranóstica. Bioimagen. Liberación Controlada de Fármacos.

1 INTRODUÇÃO

O avanço da nanotecnologia nas últimas décadas tem promovido profundas transformações na área da saúde ao permitir o desenvolvimento de materiais e sistemas em escala nanométrica capazes de interagir de forma altamente específica com estruturas biológicas. Nesse cenário, surge a nanomedicina como campo interdisciplinar que integra conhecimentos da ciência dos materiais, biologia molecular, engenharia biomédica, farmacologia e medicina para desenvolver estratégias inovadoras voltadas ao diagnóstico, monitoramento e tratamento de doenças. O interesse crescente por essa área está relacionado à possibilidade de aumentar a precisão terapêutica, reduzir efeitos adversos e ampliar a eficiência clínica dos tratamentos convencionais (Patra et al., 2018; Farzin et al., 2020; Najafi et al., 2026).

Entre os sistemas nanoestruturados mais promissores para aplicações biomédicas destacam-se as nanopartículas magnéticas, especialmente aquelas baseadas em óxidos de ferro, devido às suas propriedades superparamagnéticas, elevada biocompatibilidade, capacidade de funcionalização superficial e resposta controlada a campos magnéticos externos. Essas características permitem aplicações diversificadas em ressonância magnética, sistemas de entrega direcionada de fármacos, biossensores, hipertermia magnética e plataformas teranósticas capazes de integrar diagnóstico e terapia em um mesmo sistema (Reddy et al., 2012; Zhao et al., 2022; Gallo et al., 2025).

A utilização dessas plataformas tem adquirido especial relevância no contexto da medicina de precisão, abordagem que busca individualizar intervenções clínicas com base em características genéticas, moleculares e fisiológicas específicas de cada paciente. Diferentemente dos modelos terapêuticos convencionais, frequentemente associados à baixa seletividade e elevada toxicidade sistêmica, os sistemas nanoestruturados permitem maior direcionamento tecidual e melhor controle espacial e temporal da resposta terapêutica. Nesse sentido, avanços recentes demonstram resultados promissores em aplicações oncológicas, neurodegenerativas e regenerativas (Ma et al., 2022; Muthiah et al., 2026; Shakeri-Zadeh; Bulte, 2025).

Outro aspecto que reforça o potencial translacional das nanopartículas magnéticas está relacionado ao desenvolvimento de sistemas inteligentes responsivos ao microambiente biológico. Estratégias envolvendo estímulos físicos e químicos, como alterações de pH, temperatura e aplicação de campos magnéticos externos, têm permitido controlar de maneira mais eficiente processos de liberação medicamentosa e ativação terapêutica localizada. Além disso, plataformas híbridas associadas a técnicas de bioimagem vêm ampliando significativamente a capacidade de monitoramento em tempo real dos tratamentos (Datta et al., 2026; Nogueira et al., 2020; Lartigue et al., 2020).

Apesar dos avanços observados, a incorporação ampla dessas tecnologias ainda enfrenta desafios relacionados à hemocompatibilidade, toxicidade celular, farmacocinética, estabilidade

coloidal e biodistribuição sistêmica. Estudos recentes demonstram que alterações nas propriedades físico-químicas das nanopartículas podem modificar significativamente sua interação com tecidos biológicos, influenciando diretamente segurança e eficácia clínica. Dessa forma, compreender os mecanismos envolvidos no comportamento biológico dessas estruturas torna-se essencial para viabilizar sua aplicação em larga escala (Malehmir et al., 2023; Patil et al., 2015; Jacinto et al., 2025).

Diante desse contexto, torna-se necessária a realização de revisões que integrem as evidências recentes sobre aplicações biomédicas das nanopartículas magnéticas, permitindo identificar avanços científicos, limitações metodológicas e perspectivas futuras para consolidação da nanomedicina e da medicina de precisão como ferramentas estratégicas para os sistemas contemporâneos de saúde (Gul et al., 2019; Gomes; Domingues, 2022; Chen et al., 2025).

2 OBJETIVO

Analisar criticamente os avanços científicos relacionados às aplicações biomédicas das nanopartículas magnéticas no contexto da nanomedicina e medicina de precisão, discutindo seus mecanismos de ação, potencial diagnóstico e terapêutico, bem como os desafios associados à segurança biológica, à biocompatibilidade e à translação clínica dessas tecnologias.

3 METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão narrativa da literatura, de abordagem qualitativa, natureza básica e caráter descritivo-analítico, elaborada com a finalidade de reunir, organizar e interpretar criticamente evidências científicas relacionadas às aplicações biomédicas das nanopartículas magnéticas no contexto da nanomedicina e medicina de precisão. A escolha por esse delineamento metodológico ocorreu devido à necessidade de integrar diferentes abordagens experimentais, revisões e estudos translacionais disponíveis na literatura recente.

A busca bibliográfica foi conduzida nas bases PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science e Google Scholar, por contemplarem ampla cobertura de periódicos internacionais nas áreas de nanotecnologia, biomateriais, medicina translacional e ciências da saúde. Foram consideradas publicações entre janeiro de 2016 e junho de 2026, buscando reunir evidências atuais relacionadas aos avanços tecnológicos e às aplicações clínicas emergentes.

Foram empregados os descritores em inglês: (“*nanomedicine*” OR “*magnetic nanoparticles*” OR “*precision medicine*” OR “*drug delivery*” OR “*hyperthermia*” OR “*theranostics*” OR “*magnetic resonance imaging*”), combinados pelos operadores booleanos AND e OR, de modo a ampliar a sensibilidade e especificidade da busca.

Na etapa inicial foram identificados 73 estudos. Após remoção de 14 registros duplicados, permaneceram 59 artigos para triagem. Em seguida, 24 estudos foram excluídos após leitura de títulos

e resumos por não apresentarem relação direta com o tema proposto. Posteriormente, realizou-se leitura integral dos trabalhos elegíveis, sendo excluídos 9 estudos devido à ausência de aplicabilidade biomédica, limitações metodológicas ou insuficiência de dados analíticos, resultando na inclusão final de 26 artigos para síntese qualitativa.

Foram incluídos artigos originais, revisões narrativas, revisões sistemáticas e estudos experimentais publicados em inglês ou português, com texto completo disponível e foco em aplicações biomédicas de nanopartículas magnéticas. Foram excluídos estudos duplicados, literatura cinzenta, trabalhos ambientais sem interface com saúde e publicações sem aderência aos objetivos desta revisão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos 26 estudos incluídos permitiu identificar seis eixos temáticos que representam os principais avanços e aplicações das nanopartículas magnéticas na nanomedicina contemporânea: (I) engenharia e funcionalização de nanopartículas magnéticas; (II) nanodiagnóstico e sistemas avançados de imagem; (III) entrega direcionada de fármacos e sistemas responsivos; (IV) hipertermia magnética e terapias antitumorais; (V) biocompatibilidade, toxicidade e translação clínica; e (VI) medicina regenerativa e perspectivas futuras.

Essa organização temática permitiu integrar estudos experimentais, revisões e abordagens translacionais em uma estrutura analítica que evidencia não apenas os avanços tecnológicos recentes, mas também os desafios que ainda limitam sua implementação clínica.

4.1 EIXO 1 – ENGENHARIA E FUNCIONALIZAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS

A engenharia de nanopartículas magnéticas constitui uma das etapas mais críticas para o sucesso das aplicações biomédicas em nanomedicina. Diferentemente dos materiais convencionais, sistemas nanoestruturados apresentam propriedades fortemente dependentes da escala, de modo que pequenas alterações em tamanho, composição química, carga superficial ou revestimento podem modificar significativamente parâmetros como biodistribuição, internalização celular, estabilidade coloidal e resposta biológica.

Nesse contexto, o desenvolvimento de estratégias de funcionalização tem permitido transformar nanopartículas inicialmente passivas em plataformas inteligentes capazes de reconhecer tecidos específicos, responder a estímulos externos e executar múltiplas funções simultaneamente. O avanço recente dessas tecnologias demonstra uma transição importante da simples produção de nanomateriais para o desenvolvimento racional de sistemas multifuncionais adaptados às demandas da medicina de precisão (Reddy et al., 2012; Gul et al., 2019).

Tabela 1: Principais avanços relacionados à engenharia e funcionalização de nanopartículas magnéticas

Tema abordado	Principais características	Referênciaz
Design racional de nanopartículas	Controle de tamanho, estabilidade e magnetização	Reddy et al. (2012)
Nanopartículas biomiméticas	Direcionamento tumoral inspirado em magnetossomos	Ma et al. (2022)
Engenharia de contraste para MRI	Otimização do desempenho diagnóstico	Zhao et al. (2022)
Sistemas teranósticos	Integração entre imagem e tratamento	Muthiah et al. (2026)
Sistemas híbridos magnéticos	Associação entre propriedades magnéticas e ópticas	Thanh et al. (2022)
Revisão de plataformas magnéticas	Aplicações biomédicas modernas	Gul et al. (2019)

Fonte: Autores.

Conforme demonstrado na Tabela 1, observa-se uma evolução progressiva da engenharia de nanopartículas desde sistemas magnéticos convencionais até plataformas multifuncionais de elevada complexidade tecnológica. Inicialmente, o foco encontrava-se na obtenção de partículas estáveis e magneticamente eficientes; entretanto, os estudos mais recentes passaram a incorporar elementos de reconhecimento molecular, sistemas responsivos e integração de múltiplas modalidades terapêuticas e diagnósticas em uma única nanoestrutura. Esse movimento acompanha diretamente a evolução do conceito de medicina de precisão, que exige abordagens cada vez mais específicas e adaptáveis ao perfil biológico individual.

Outro aspecto relevante evidenciado pelos estudos refere-se ao crescimento das estratégias biomiméticas e híbridas. A utilização de mecanismos inspirados em estruturas biológicas naturais, como magnetossomos bacterianos, representa tentativa de reproduzir propriedades evolutivamente otimizadas para melhorar desempenho fisiológico. Paralelamente, a associação entre propriedades magnéticas, ópticas e químicas tem ampliado o potencial de aplicação clínica dessas plataformas. Entretanto, apesar dos avanços observados, persistem desafios relacionados à reprodutibilidade da síntese, estabilidade em larga escala e validação regulatória, fatores que ainda limitam sua incorporação ampla na prática clínica.

4.2 EIXO 2 – NANODIAGNÓSTICO E SISTEMAS AVANÇADOS DE IMAGEM

A incorporação das nanopartículas magnéticas ao diagnóstico representa um dos campos mais consolidados da nanomedicina contemporânea. O desenvolvimento de sistemas capazes de detectar alterações moleculares antes do aparecimento de manifestações clínicas evidentes tem contribuído significativamente para o fortalecimento do diagnóstico precoce e da medicina personalizada. Nesse contexto, as nanopartículas magnéticas apresentam vantagens importantes em relação aos métodos convencionais por permitirem maior sensibilidade diagnóstica, contraste otimizado e possibilidade de direcionamento específico para biomarcadores celulares e moleculares.

Os sistemas diagnósticos baseados em nanomateriais magnéticos têm sido amplamente empregados em técnicas de bioimagem, especialmente em ressonância magnética (MRI), devido à capacidade dessas estruturas de modificar localmente propriedades magnéticas dos tecidos e melhorar a resolução diagnóstica. Além disso, a funcionalização dessas nanopartículas permite sua associação

com moléculas reconhecedoras, aptâmeros e agentes fluorescentes, ampliando sua capacidade de identificação seletiva de tecidos e monitoramento terapêutico em tempo real (Zhao et al., 2022; Lartigue et al., 2020).

Outro aspecto relevante refere-se ao avanço dos sistemas multimodais de imagem, capazes de combinar diferentes tecnologias em uma única plataforma diagnóstica. Essa abordagem busca superar limitações individuais das técnicas tradicionais e fornecer simultaneamente informações anatômicas, funcionais e moleculares. Estudos recentes também têm demonstrado o potencial das plataformas teranósticas para integrar funções diagnósticas e terapêuticas em sistemas únicos, fortalecendo o conceito de medicina de precisão (Gallo et al., 2025).

Tabela 2: Aplicações das nanopartículas magnéticas no nanodiagnóstico e bioimagem

Aplicação	Principais características	Referência
Ressonância magnética baseada em óxido de ferro	Melhora do contraste e aumento da resolução diagnóstica	Zhao et al. (2022)
Imagem multimodal	Integração entre ressonância magnética e fluorescência	Lartigue et al. (2020)
Reconhecimento molecular direcionado	Aplicação de aptâmeros para identificação celular específica	Keshtkar et al. (2016)
Imagem por partículas magnéticas	Monitoramento tumoral e quantificação celular	Fernando et al. (2024)
Sistemas integrados de imagem e terapia	Associação entre diagnóstico e intervenção terapêutica	Gallo et al. (2025)

Fonte: Autores.

Os estudos apresentados na Tabela 2 demonstram uma mudança importante no paradigma diagnóstico contemporâneo. Tradicionalmente, técnicas de imagem eram utilizadas predominantemente para identificar alterações anatômicas já estabelecidas. Entretanto, os avanços proporcionados pela nanomedicina permitiram ampliar significativamente a capacidade diagnóstica por meio da detecção precoce de alterações celulares e moleculares que antecedem manifestações clínicas evidentes. Esse aspecto apresenta elevada relevância especialmente em doenças de progressão silenciosa, como neoplasias e doenças neurodegenerativas, nas quais o diagnóstico precoce está diretamente relacionado à melhora dos desfechos clínicos.

Observa-se ainda que a integração entre múltiplas modalidades diagnósticas representa uma tendência consolidada na medicina contemporânea. Sistemas híbridos possibilitam superar limitações isoladas das técnicas convencionais, combinando maior resolução espacial, sensibilidade molecular e capacidade de monitoramento dinâmico. Além disso, plataformas teranósticas ampliam o potencial translacional dessas tecnologias ao permitir diagnóstico e tratamento em um mesmo sistema nanoestruturado. Apesar dos resultados promissores, desafios relacionados à validação clínica, padronização metodológica, custos operacionais e regulamentação ainda permanecem como obstáculos para incorporação ampla dessas tecnologias nos sistemas de saúde.

4.3 EIXO 3 – ENTREGA DIRECIONADA DE FÁRMACOS E SISTEMAS RESPONSIVOS

Entre as aplicações mais promissoras da nanomedicina contemporânea destaca-se o desenvolvimento de sistemas de entrega direcionada de fármacos (drug delivery), cujo objetivo principal consiste em aumentar a concentração terapêutica em tecidos-alvo e reduzir efeitos adversos sistêmicos. Nesse contexto, as nanopartículas magnéticas têm despertado grande interesse devido à possibilidade de controle externo por campos magnéticos e elevada capacidade de funcionalização, permitindo maior seletividade e eficiência terapêutica.

Os sistemas convencionais de administração de medicamentos frequentemente apresentam limitações relacionadas à baixa biodisponibilidade, degradação precoce, distribuição inespecífica e necessidade de doses elevadas para alcançar concentrações terapêuticas adequadas. A aplicação de nanocarreadores surge como alternativa para superar essas limitações ao proporcionar proteção do princípio ativo, controle cinético de liberação e aumento da permanência sistêmica dos compostos terapêuticos (Patra et al., 2018; Wahajuddin; Arora, 2012).

Nos estudos analisados, observou-se crescente utilização de sistemas responsivos ao microambiente biológico, capazes de modular a liberação do fármaco em resposta a estímulos específicos como alterações de pH, temperatura, gradientes enzimáticos e aplicação de campos magnéticos externos. Esses sistemas representam importante avanço para consolidação da medicina de precisão, permitindo intervenções mais individualizadas e menos invasivas (Datta et al., 2026).

Além disso, abordagens híbridas têm permitido integrar entrega medicamentosa, monitoramento por imagem e controle terapêutico em uma mesma plataforma nanoestruturada. Tal integração aproxima a nanomedicina do conceito de plataformas inteligentes capazes de atuar de forma adaptativa conforme as condições fisiológicas do paciente (Farzin et al., 2020).

Tabela 3: Aplicações das nanopartículas magnéticas na entrega direcionada de fármacos

Aplicação	Principais características	Referência
Sistemas nanoestruturados para entrega de medicamentos	Aumento da biodisponibilidade e redução da toxicidade	Patra et al. (2018)
Nanocarreadores magnéticos	Direcionamento terapêutico por campo magnético	Wahajuddin; Arora (2012)
Liberação responsiva ao pH	Controle seletivo da liberação de doxorrubicina	Nogueira et al. (2020)
Sistemas inteligentes de administração	Resposta a estímulos biológicos endógenos	Datta et al. (2026)
Aplicações terapêuticas integradas	Associação entre diagnóstico e tratamento	Farzin et al. (2020)

Fonte: Autores.

Conforme observado na Tabela 3, os avanços na entrega direcionada de fármacos refletem uma mudança importante na forma como os tratamentos vêm sendo concebidos. Em vez da administração sistêmica convencional, busca-se atualmente controlar espacial e temporalmente a exposição medicamentosa, aumentando a eficácia terapêutica e reduzindo efeitos colaterais. Esse conceito

apresenta especial relevância em áreas como oncologia, nas quais grande parte da toxicidade decorre da baixa seletividade dos tratamentos tradicionais.

Outro aspecto importante observado nos estudos refere-se ao crescimento dos sistemas responsivos ao microambiente biológico. A possibilidade de liberar medicamentos apenas em regiões específicas, como tecidos tumorais ou áreas inflamatórias, representa avanço significativo na racionalização terapêutica. Apesar do elevado potencial translacional, desafios relacionados à produção em larga escala, estabilidade farmacêutica e regulamentação ainda precisam ser superados para consolidação desses sistemas na prática clínica.

4.4 EIXO 4 – HIPERTERMIA MAGNÉTICA E TERAPIAS ANTITUMORAIS

A hipertermia magnética constitui uma das estratégias terapêuticas mais inovadoras da nanomedicina contemporânea e baseia-se na capacidade das nanopartículas magnéticas converterem energia proveniente de campos magnéticos alternados em calor localizado. O aumento controlado da temperatura tecidual promove alterações estruturais e metabólicas capazes de induzir apoptose celular, aumentar sensibilidade a terapias convencionais e modular respostas imunológicas antitumorais.

Nos últimos anos, o desenvolvimento dessa tecnologia passou a ser fortemente impulsionado pela necessidade de tratamentos oncológicos mais seletivos e menos agressivos. Diferentemente de abordagens convencionais, a hipertermia magnética permite concentração do efeito terapêutico diretamente na região tumoral, reduzindo danos aos tecidos adjacentes (Chen et al., 2025; Shakeri-Zadeh; Bulte, 2025).

Os estudos analisados demonstraram que temperaturas entre aproximadamente 41 °C e 46 °C promovem alterações celulares importantes, incluindo desnaturação proteica, aumento da permeabilidade membranar e indução de estresse oxidativo. Além disso, evidências recentes indicam que o aquecimento localizado pode estimular mecanismos imunológicos relevantes, ampliando o potencial terapêutico dessas plataformas (Jiao et al., 2025).

Também foi observado crescimento das abordagens híbridas que associam hipertermia magnética com quimioterapia, imunoterapia e técnicas avançadas de bioimagem, reforçando o conceito de terapias combinadas e personalizadas (Carter et al., 2021).

Tabela 4: Aplicações da hipertermia magnética no tratamento oncológico

Aplicação	Principais características	Referência
Hipertermia guiada por imagem	Monitoramento térmico em tempo real	Shakeri-Zadeh; Bulte (2025)
Terapia térmica associada à liberação de fármacos	Aquecimento e administração simultânea	Chen et al. (2025)
Sistemas magnetoplasmônicos	Associação entre aquecimento magnético e óptico	Thanh et al. (2022)
Ativação imune localizada	Estímulo de resposta antitumoral	Carter et al. (2021)
Nanoimunoterapia baseada em hipertermia	Modulação imune e destruição tumoral	Jiao et al. (2025)

Fonte: Autores.

Os resultados apresentados na Tabela 4 demonstram que a hipertermia magnética vem deixando de ser interpretada apenas como uma técnica de destruição térmica tumoral para assumir papel mais amplo dentro da medicina de precisão. Atualmente, observa-se integração crescente entre aquecimento localizado, sistemas de imagem, entrega terapêutica e modulação imunológica, ampliando significativamente o potencial clínico dessas abordagens.

Outro ponto relevante refere-se ao fortalecimento do conceito de terapias combinadas. Os estudos indicam que a associação entre hipertermia e outras modalidades terapêuticas produz efeitos superiores quando comparada às abordagens isoladas, especialmente pela possibilidade de reduzir doses medicamentosas e aumentar seletividade. Entretanto, questões relacionadas à distribuição homogênea das nanopartículas, controle preciso da temperatura e validação clínica multicêntrica ainda permanecem como desafios importantes para ampla implementação dessa tecnologia.

4.5 EIXO 5 – BIOCOMPATIBILIDADE, TOXICIDADE E DESAFIOS PARA TRANSLAÇÃO CLÍNICA

Apesar dos avanços observados no desenvolvimento de nanopartículas magnéticas para aplicações biomédicas, a segurança biológica permanece como um dos principais obstáculos para sua consolidação clínica. Diferentemente dos medicamentos convencionais, os sistemas nanoestruturados apresentam interações complexas com fluidos biológicos, membranas celulares, proteínas plasmáticas e mecanismos fisiológicos de eliminação, tornando indispensável a avaliação aprofundada de parâmetros relacionados à biocompatibilidade e toxicidade.

Nesse contexto, estudos recentes têm demonstrado que propriedades físico-químicas como tamanho, forma, composição química, carga superficial, revestimento e estabilidade coloidal exercem influência direta sobre absorção celular, circulação sanguínea, acúmulo tecidual e resposta imunológica. Alterações nesses parâmetros podem resultar tanto em melhora terapêutica quanto em aumento do risco de citotoxicidade e inflamação sistêmica (Reddy et al., 2012; Patil et al., 2015).

Outro aspecto relevante refere-se ao destino biológico das nanopartículas após administração. Uma vez introduzidas no organismo, essas estruturas passam por processos complexos de adsorção proteica, internalização celular, remodelamento superficial, biodegradação e eliminação. Dependendo da composição e persistência tecidual, pode ocorrer geração excessiva de espécies reativas de oxigênio (ROS), ativação inflamatória e alterações metabólicas que comprometem a segurança clínica (Jacinto et al., 2025).

Além disso, avanços recentes têm direcionado atenção especial para a hemocompatibilidade, uma vez que muitas aplicações envolvem administração intravenosa. A interação inadequada com hemácias, plaquetas e proteínas plasmáticas pode comprometer estabilidade circulatória e limitar aplicações clínicas em larga escala (Malehmir et al., 2023).

Tabela 5: Aspectos relacionados à biocompatibilidade, toxicidade e translação clínica das nanopartículas magnéticas

Aplicação	Principais características	Referência
Projeto racional de nanopartículas	Controle estrutural para reduzir efeitos adversos	Reddy et al. (2012)
Hemocompatibilidade	Interação com componentes sanguíneos	Malehmir et al. (2023)
Destino biológico das nanopartículas	Biodistribuição, degradação e eliminação	Jacinto et al. (2025)
Avaliação toxicológica	Quantificação de citotoxicidade e ROS	Patil et al. (2015)
Sistemas multifuncionais	Segurança associada ao aumento da complexidade estrutural	Gallo et al. (2025)

Fonte: Autores.

Conforme observado na Tabela 5, os desafios relacionados à segurança biológica não representam apenas limitações técnicas, mas fatores determinantes para viabilidade clínica das plataformas nanoestruturadas. Embora muitos estudos demonstrem elevada eficácia terapêutica em ambiente experimental, a extrapolação para aplicações humanas exige compreensão aprofundada dos mecanismos de interação biológica e comportamento em longo prazo.

Outro ponto importante refere-se à necessidade de padronização metodológica dos testes de nanotoxicidade. Atualmente, diferenças nos modelos celulares, protocolos experimentais e critérios de avaliação dificultam comparações entre estudos e retardam processos regulatórios. Dessa forma, o fortalecimento de protocolos padronizados e estudos translacionais multicêntricos constitui etapa essencial para ampliar segurança e acelerar incorporação dessas tecnologias aos sistemas de saúde.

4.6 EIXO 6 – MEDICINA REGENERATIVA E PERSPECTIVAS FUTURAS DA NANOMEDICINA

Além das aplicações diagnósticas e terapêuticas convencionais, as nanopartículas magnéticas têm ampliado progressivamente seu campo de atuação para áreas relacionadas à medicina regenerativa, engenharia tecidual e construção de sistemas biomiméticos capazes de reproduzir funções fisiológicas complexas.

A medicina regenerativa busca restaurar tecidos lesionados por meio da combinação entre células, biomateriais e sinais biofísicos. Nesse cenário, os sistemas magnéticos apresentam vantagens importantes por permitirem manipulação celular remota, organização espacial de estruturas tridimensionais e controle da diferenciação celular por estímulos externos (Gomes; Domingues, 2022).

Paralelamente, o desenvolvimento de plataformas híbridas tem ampliado possibilidades terapêuticas por integrar materiais responsivos, sistemas inteligentes e biofabricação avançada. Estratégias recentes incluem uso de hidrogéis magnéticos, bioimpressão tridimensional e sistemas capazes de responder dinamicamente ao ambiente celular.

Outro campo emergente corresponde à integração entre nanomedicina, inteligência artificial e plataformas digitais de monitoramento terapêutico. Essa convergência tecnológica tem potencial para

transformar profundamente a medicina de precisão ao permitir intervenções cada vez mais individualizadas e adaptativas (Datta et al., 2026).

Tabela 6: Aplicações emergentes das nanopartículas magnéticas e perspectivas futuras

Aplicação	Principais características	Referência
Medicina regenerativa	Manipulação celular e engenharia tecidual	Gomes; Domingues (2022)
Sistemas inteligentes	Resposta adaptativa ao ambiente biológico	Datta et al. (2026)
Plataformas multifuncionais	Integração entre diagnóstico e tratamento	Gul et al. (2019)
Sistemas híbridos	Associação entre múltiplas modalidades terapêuticas	Farzin et al. (2020)
Engenharia avançada de nanomateriais	Desenvolvimento translacional futuro	Najafi et al. (2026)

Fonte: Autores.

Os estudos apresentados na Tabela 6 indicam que a evolução da nanomedicina ultrapassa o conceito inicial de transporte de medicamentos e caminha para construção de plataformas biomédicas inteligentes capazes de interagir dinamicamente com tecidos e sistemas biológicos. Essa mudança representa importante avanço conceitual, aproximando o desenvolvimento tecnológico de modelos terapêuticos verdadeiramente personalizados.

Além disso, observa-se que o futuro da nanomedicina dependerá não apenas do desenvolvimento de novos materiais, mas da integração entre diferentes áreas do conhecimento, incluindo biologia molecular, engenharia biomédica, ciência dos materiais, inteligência artificial e saúde pública. Nesse sentido, espera-se que as próximas décadas sejam marcadas pela consolidação de abordagens mais seguras, adaptativas e centradas nas características individuais dos pacientes, fortalecendo definitivamente o paradigma da medicina de precisão.

5 CONCLUSÃO

A presente revisão permitiu evidenciar que a nanomedicina associada à medicina de precisão representa uma das áreas mais promissoras da ciência contemporânea aplicada à saúde, especialmente pelo avanço das nanopartículas magnéticas como plataformas multifuncionais para diagnóstico, monitoramento e tratamento de doenças. A análise dos estudos incluídos demonstrou que essas estruturas apresentam elevada versatilidade tecnológica, sendo capazes de integrar propriedades físico-químicas avançadas com aplicações biomédicas direcionadas, ampliando significativamente o potencial das abordagens terapêuticas e diagnósticas tradicionais.

Os resultados evidenciaram que o desenvolvimento racional das nanopartículas magnéticas tem permitido avanços expressivos em diferentes frentes da prática biomédica, incluindo sistemas avançados de bioimagem, entrega direcionada de fármacos, hipertermia magnética, plataformas teranósticas e aplicações emergentes em medicina regenerativa. Observou-se ainda que estratégias de funcionalização superficial e integração multimodal vêm contribuindo para aumentar seletividade

biológica, eficiência terapêutica e capacidade de monitoramento em tempo real, aproximando essas tecnologias do conceito contemporâneo de medicina personalizada.

Entre os principais avanços identificados, destacam-se o crescimento dos sistemas responsivos ao microambiente biológico, o fortalecimento das abordagens híbridas associando diagnóstico e tratamento em uma mesma plataforma e a expansão das aplicações relacionadas à modulação imunológica e engenharia tecidual. Esses resultados demonstram que a evolução da nanomedicina não se limita ao desenvolvimento de novos materiais, mas envolve a construção de sistemas inteligentes capazes de interagir dinamicamente com processos biológicos complexos.

Entretanto, apesar do elevado potencial translacional observado, permanecem desafios importantes relacionados à hemocompatibilidade, biodistribuição, toxicidade em longo prazo, estabilidade fisiológica e padronização dos protocolos de avaliação clínica. Os estudos analisados demonstram que ainda existe considerável distância entre os resultados experimentais e a ampla implementação dessas tecnologias na prática clínica cotidiana, evidenciando a necessidade de estudos multicêntricos, validação regulatória e fortalecimento da pesquisa translacional.

Dessa forma, conclui-se que as nanopartículas magnéticas ocupam posição estratégica na consolidação da nanomedicina e da medicina de precisão como modelos inovadores para o cuidado em saúde. O avanço dessas tecnologias dependerá da integração entre nanotecnologia, ciência dos materiais, biologia molecular, engenharia biomédica e medicina translacional, permitindo o desenvolvimento de intervenções cada vez mais seguras, individualizadas e capazes de responder às demandas crescentes dos sistemas contemporâneos de saúde.

Além disso, espera-se que os próximos avanços científicos estejam direcionados não apenas ao aperfeiçoamento técnico desses nanossistemas, mas também à ampliação da acessibilidade e aplicabilidade clínica dessas tecnologias, favorecendo sua incorporação futura em estratégias diagnósticas e terapêuticas mais eficientes, sustentáveis e centradas no paciente.

REFERÊNCIAS

CARTER, T. J.; AGLIARDI, G.; LIN, F.; et al. **Potential of Magnetic Hyperthermia to Stimulate Localized Immune Activation**. Small, v. 17, p. 2005241, 2021.

CHEN, Y.; SUN, H.; LI, Y.; et al. **Magnetic nanomaterials for hyperthermia-based therapy and controlled drug delivery**. Bioactive Materials, v. 53, p. 591–629, 2025.

DATTA, D.; COLACO, V.; NISON, M.; et al. **Smart microdevices for biomedical drug delivery: endogenous stimuli as the key to safer therapeutics**. RSC Advances, v. 16, p. 14878–14935, 2026. DOI: https://doi.org/10.1039/D5RA09767C

FARZIN, A.; ETESAMI, S. A.; QUINT, J.; MEMIC, A.; TAMAYOL, A. **Magnetic nanoparticles in cancer therapy and diagnosis**. Advanced Healthcare Materials, v. 9, n. 9, e1901058, 2020. DOI: https://doi.org/10.1002/adhm.201901058

FERNANDO, N.; GEVAERT, J. J.; KONKLE, J.; et al. **Focused small field of view magnetic particle imaging for the detection and quantification of tumour associated macrophages**. bioRxiv, 2024. DOI: https://doi.org/10.1101/2023.06.22.545970

GALLO, J.; STASIUK, G. J.; ROIG, A.; PELLICO, J. **Editorial: Magnetic nanoparticles for biomedical imaging and therapy applications**. Frontiers in Chemistry, v. 13, 1670850, 2025. DOI: https://doi.org/10.3389/fchem.2025.1670850

GOMES, M. E.; DOMINGUES, R. M. A. **Magnetic Systems for Regenerative Medicine**. Advanced Functional Materials, 2022.

GUL, S.; KHAN, S. B.; REHMAN, I. U.; et al. **A Comprehensive Review of Magnetic Nanomaterials Modern Day Theranostics**. Frontiers in Materials, v. 6, p. 179, 2019. DOI: https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00179

JACINTO, C.; JAVED, Y.; LAVORATO, G.; et al. **Biotransformation and biological fate of magnetic iron oxide nanoparticles for biomedical research and clinical applications**. Nanoscale Advances, v. 7, p. 2818–2886, 2025.

JIAO, W.; DAI, L.; YAN, B.; et al. **Heating up the immune battle: Magnetic hyperthermia against cancer**. Fundamental Research, v. 5, p. 2401–2405, 2025.

KESHTKAR, M.; SHAHBAZI-GAHROUEI, D.; KHOSHFETRAT, S. M.; MEHRGARDI, M. A.; AGHAEI, M. **Aptamer-conjugated Magnetic Nanoparticles as Targeted Magnetic Resonance Imaging Contrast Agent for Breast Cancer**. Journal of Medical Signals and Sensors, v. 6, n. 4, p. 243–247, 2016.

LARTIGUE, L.; COUPEAU, M.; LESAULT, M. **Luminophore and Magnetic Multicore Nanoassemblies for Dual-Mode MRI and Fluorescence Imaging**. Nanomaterials, v. 10, n. 1, p. 28, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/nano10010028

LAU, E. C. H. T.; YIU, H. H. P. **Enzyme immobilization on magnetic nanoparticle supports for enhanced separation and recycling of catalysts**. In: Nanomaterials for Biocatalysis. Elsevier, 2022.

LIU, B.; WU, Y.; XING, Z.; et al. **Optimization of Magnetic Biochar Preparation Process, Based on Methylene Blue Adsorption**. Molecules, v. 29, p. 5213, 2024.

MA, K.; XU, S.; TAO, T.; et al. **Magnetosome-inspired synthesis of soft ferrimagnetic nanoparticles for magnetic tumor targeting**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 119, n. 45, e2211228119, 2022. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.2211228119

MALEHMIR, S.; ESMAILI, M. A.; KHAKSARY MAHABADY, M.; et al. **A review: hemocompatibility of magnetic nanoparticles and their regenerative medicine, cancer therapy, drug delivery, and bioimaging applications**. Frontiers in Chemistry, v. 11, 1249134, 2023.

MUTHIAH, K. S.; THIRUMURUGAN, S.; RAMANATHAN, S.; et al. **Theranostic Angiopep-2-Conjugated FeTaOx@Au Core–Shell Magnetic Nanoparticles for Glioma Treatment and Dual Medical Imaging**. ACS Applied Bio Materials, v. 9, p. 1023–1038, 2026. DOI: https://doi.org/10.1021/acsabm.5c01925

NAJAFI, F.; MALEKI-HAJIAGHA, A.; KAVEH FARSANI, N.; et al. **Magnetic nanoparticles as promising materials for the future of medicine**. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, v. 37, n. 37, 2026. DOI: https://doi.org/10.1007/s10856-025-06981-5

NOGUEIRA, J.; SOARES, S. F.; AMORIM, C. O.; et al. **Magnetic Driven Nanocarriers for pH-Responsive Doxorubicin Release in Cancer Therapy**. Molecules, v. 25, n. 2, p. 333, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules25020333

PATIL, U. S.; ADIREDDY, S.; JAISWAL, A.; et al. **In Vitro/In Vivo Toxicity Evaluation and Quantification of Iron Oxide Nanoparticles**. International Journal of Molecular Sciences, v. 16, p. 24417–24450, 2015.

PATRA, J. K.; DAS, G.; FRACETO, L. F.; et al. **Nano based drug delivery systems: recent developments and future prospects**. Journal of Nanobiotechnology, v. 16, n. 1, p. 71, 2018. DOI: https://doi.org/10.1186/s12951-018-0392-8

REDDY, L. H.; ARIAS, J. L.; NICOLAS, J.; COUVREUR, P. **Magnetic Nanoparticles: Design and Characterization, Toxicity and Biocompatibility, Pharmaceutical and Biomedical Applications**. Chemical Reviews, v. 112, n. 11, p. 5818–5878, 2012. DOI: https://doi.org/10.1021/cr300068p

SHAKERI-ZADEH, A.; BULTE, J. W. M. **Imaging-guided precision hyperthermia with magnetic nanoparticles**. Nature Reviews Bioengineering, v. 3, n. 3, p. 245–260, 2025.

THANH, D. Q.; TUAN, D. V.; NAM, N. H.; et al. **Synthesis of magneto-plasmonic hybrid material for cancer hyperthermia**. Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, n. 81, p. 128–137, 2022.

WAHAJUDDIN; ARORA, S. **Superparamagnetic iron oxide nanoparticles: magnetic nanoplatforms as drug carriers**. International Journal of Nanomedicine, v. 7, p. 3445–3471, 2012. DOI: https://doi.org/10.2147/IJN.S30320

ZHAO, Z.; LI, M.; ZENG, J.; et al. **Recent advances in engineering iron oxide nanoparticles for effective magnetic resonance imaging**. Bioactive Materials, v. 12, p. 214–245, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.10.014