



Nanotecnologia: fundamentos, aplicações multidisciplinares e perspectivas futuras

Ana Júlia M. T. Sales¹
Brenda Pereira Guimarães¹
Elenir Souza Santos Rocha²
Robson Silva da França³

1. anajus0311@gmail.com; 1. brendaa156p@gmail.com; 2. elenirsantos@yahoo.com.br; 3. robsonsilvafranca@gmail.com

1. *Graduação em Biotecnologia pela Universidade Federal da Bahia, Instituto Multidisciplinar em Saúde, Campus Anísio Teixeira, Vitória da Conquista - Bahia.* 2. *Doutora em Química Analítica e Professora da Universidade Federal da Bahia, Instituto Multidisciplinar em Saúde, Campus Anísio Teixeira, Vitória da Conquista - Bahia;* 3. *Mestre em Química Analítica e Técnico em Química da Universidade Federal da Bahia, Instituto Multidisciplinar em Saúde, Campus Anísio Teixeira, Vitória da Conquista - Bahia;*

Resumo

A nanotecnologia destaca-se como uma das áreas científicas mais inovadoras e estratégicas da atualidade, reunindo conhecimentos da física, química, biologia, engenharia e medicina para manipular a matéria em escala nanométrica, entre 1 e 100 nanômetros. Nessa dimensão, os materiais apresentam propriedades físico-químicas diferenciadas, como maior área superficial, elevada reatividade, alterações na condutividade elétrica e maior resistência mecânica, características inexistentes em escalas convencionais e que ampliam significativamente suas possibilidades de aplicação. Este artigo de revisão bibliográfica analisa os fundamentos históricos, conceituais e técnicos da nanotecnologia, além de discutir suas aplicações nos campos da medicina e biotecnologia, eletrônica e computação, meio ambiente e energia. A natureza interdisciplinar da nanociência justifica a integração entre diferentes áreas do conhecimento, uma vez que seus avanços impactam diretamente setores científicos, industriais e sociais. A metodologia utilizada consistiu em revisão narrativa da literatura, com levantamento de fontes indexadas nas bases Scielo, Google Scholar e PubMed, priorizando publicações entre 2014 e 2026. Também foram incluídas obras clássicas da área, como os estudos pioneiros de Feynman (1959) e Drexler (1986), essenciais para a compreensão histórica da nanociência. Os resultados demonstram que a nanotecnologia possui elevado potencial transformador, embora ainda existam desafios importantes relacionados à toxicidade dos nanomateriais, à ausência de regulamentações consolidadas e às desigualdades no acesso às tecnologias emergentes. Conclui-se que o desenvolvimento seguro e sustentável da nanotecnologia depende de abordagens interdisciplinares, governança ética e marcos regulatórios capazes de conciliar inovação científica com proteção ambiental e da saúde humana.

Palavras-chave: nanotecnologia; nanomateriais; nanomedicina; sustentabilidade; regulamentação.

1. Introdução

A nanotecnologia pode ser definida como a área da ciência e da tecnologia dedicada à manipulação da matéria em escala molecular e atômica, com dimensões geralmente inferiores a 100 nanômetros (nm). Para situar essa grandeza, um nanômetro equivale a um bilionésimo de metro, distância consideravelmente menor que o diâmetro



de um fio de cabelo humano. Nessa escala, os materiais exibem propriedades físicas, químicas e biológicas únicas, distintas daquelas observadas nas suas formas macroscópicas, o que abre perspectivas inovadoras para diversas áreas do conhecimento.

O interesse científico pela miniaturização extrema foi inaugurado em 29 de dezembro de 1959, quando o físico norte-americano Richard P. Feynman proferiu a célebre conferência "Há muito espaço lá embaixo" (*There's Plenty of Room at the Bottom*), no Instituto de Tecnologia da Califórnia. Nessa ocasião, Feynman antecipou a possibilidade de construir estruturas átomo a átomo, muito antes de o termo circuito integrado (chip) integrar o vocabulário tecnológico cotidiano (Feynman, 1960).

A denominação 'nanotecnologia', por sua vez, foi cunhada pelo pesquisador japonês Norio Taniguchi em 1974 (Taniguchi, 1974), ao passo que a consolidação teórica e divulgação ampla da área coube ao engenheiro norte-americano Eric Drexler, com a publicação do livro "Motores da Criação" (*Engines of Creation*), em 1986 (Drexler, 1986).

A partir dos anos 1980, descobertas como a invenção do microscópio de varredura por tunelamento (STM), a identificação dos fulerenos, dos nanotubos de carbono e o isolamento do grafeno confirmaram e ampliaram a visão de Feynman, conferindo à nanotecnologia estatuto de prioridade estratégica em nações desenvolvidas.

Nos Estados Unidos, a criação da iniciativa nacional de nanotecnologia (National Nanotechnology Initiative, NNI), em 2000, com dotação orçamentária inicial de 497 milhões de dólares, simbolizou o reconhecimento governamental do potencial transformador da área (National Nanotechnology Initiative, 2024)

Diante desse cenário, o presente artigo tem por objetivo sistematizar os fundamentos históricos e conceituais da nanotecnologia, descrever seus principais métodos de síntese e caracterização e analisar aplicações multidisciplinares nas áreas de medicina, eletrônica, meio ambiente e energia, discutindo ainda os desafios éticos, regulatórios e de segurança que acompanham o avanço da área.

2. Percurso metodológico

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão narrativa de literatura, modalidade que possibilita a síntese crítica e interpretativa do estado do conhecimento sobre um tema, sem a pretensão de esgotar sistematicamente toda a produção disponível,



mas permitindo uma análise aprofundada e contextualizada dos fundamentos e aplicações da nanotecnologia (Rother, 2007).

A pesquisa bibliográfica foi conduzida nas bases de dados Scielo, Google Scholar e PubMed, com emprego dos descritores 'nanotecnologia', 'nanomateriais', 'nanomedicina', 'nanotubos de carbono', 'grafeno' e seus equivalentes em inglês, combinados por meio dos operadores booleanos AND e OR. O levantamento abrangeu predominantemente publicações do período de 2014 a 2026, com inclusão complementar de obras clássicas da nanociência publicadas entre 1959 e 1991, priorizando artigos originais, artigos de revisão, livros técnicos e documentos institucionais de organismos de referência, como a iniciativa nacional de nanotecnologia (NNI) e a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA).

Os critérios de inclusão contemplaram: (i) publicações em português, inglês ou espanhol; (ii) trabalhos que abordassem fundamentos, métodos de síntese, caracterização ou aplicações da nanotecnologia; (iii) textos disponíveis integralmente. Foram excluídos materiais de divulgação sem referencial científico identificável, resumos de eventos não publicados em anais revisados por pares e trabalhos que tratavam de aplicações estritamente militares ou de segurança nacional, por fugirem ao escopo multidisciplinar do presente estudo.

A análise do material selecionado foi realizada de forma qualitativa, por meio de leitura crítica e interpretativa, organizando o conteúdo em eixos temáticos: (a) história e marcos da nanociência; (b) fundamentos e métodos de síntese e caracterização; (c) aplicações multidisciplinares; e (d) desafios éticos, regulatórios e de segurança. Essa organização orientou a estrutura expositiva do artigo, favorecendo a visão integrada e interdisciplinar do tema.

3. Fundamentos da nanotecnologia

3.1 Conceitos básicos e escala nanométrica

A nanoescala refere-se ao intervalo dimensional entre 1 e 100 nanômetros. Nessa faixa, os materiais apresentam comportamento regido por efeitos quânticos e por uma elevada razão entre área de superfície e volume, o que confere propriedades físico-químicas radicalmente distintas das verificadas em escala macroscópica. Tais propriedades incluem maior resistência mecânica, alterações na condutividade elétrica e



maior reatividade química, características exploradas na fabricação de nanomateriais com funções específicas (Jeevanandam *et al.*, 2018).

Os nanomateriais constituem a classe de materiais projetados nessa escala, podendo assumir diversas morfologias: nanopartículas esféricas, nanotubos, nanofilmes e nanocompósitos, estes últimos resultantes da combinação de nanopartículas com matrizes de outros materiais para otimização de propriedades funcionais. A compreensão dessas categorias é indispensável para o design racional de aplicações tecnológicas (Omeiza *et al.*, 2022).

3.2 Marcos históricos na nanociência

O desenvolvimento da nanotecnologia pode ser delimitado por marcos científicos decisivos. Em 1981, Gerd Binnig e Heinrich Rohrer elaboraram o microscópio de varredura por tunelamento (STM), instrumento que possibilitou, pela primeira vez, a visualização de átomos individuais (Jeevanandam *et al.*, 2018). Em 1985, Harold Kroto, Richard Smalley e Robert Curl descobriram os fulerenos, nova forma alotrópica do carbono, trabalho que lhes rendeu o Prêmio Nobel de Química em 1996 (Curl; Kroto; Smalley, 1985). Em 1991, Sumio Iijima identificou os nanotubos de carbono, estruturas cilíndricas com propriedades mecânicas e elétricas excepcionais (Iijima, 1991). Em 2004, Andre Geim e Konstantin Novoselov isolaram o grafeno, uma folha monoatômica de carbono em rede hexagonal, conquista reconhecida com o Prêmio Nobel de Física em 2010 (Geim; Novoselov, 2007).

4. Síntese e caracterização de nanomateriais

4.1 Abordagens top-down e bottom-up

A fabricação de nanomateriais organiza-se em duas abordagens complementares. A abordagem top-down consiste na miniaturização progressiva de materiais em escala maior até atingir dimensões nanométricas, tendo a litografia como exemplo paradigmático.

Essa estratégia é eficaz para a produção de estruturas altamente definidas, mas pode ser limitada por defeitos introduzidos no processo de redução dimensional, além de apresentar restrições quanto à resolução mínima alcançável e ao elevado custo energético envolvido.



A abordagem bottom-up, em contrapartida, propõe a construção de estruturas a partir de unidades fundamentais, átomos e moléculas, recorrendo a processos como a automontagem molecular e a deposição química de vapor (CVD).

Equipamentos especializados, como reatores de plasma (PECVD), sistemas de deposição física de vapor (PVD) e equipamentos de litografia por feixe de elétrons (EBL), viabilizam o controle preciso das condições de reação e a obtenção de nanomateriais com alta pureza e reprodutibilidade.

Essa estratégia proporciona maior precisão estrutural e reduz significativamente a geração de resíduos no processo produtivo, características que a tornam mais compatível com os princípios da química verde e com as demandas contemporâneas por processos industriais ambientalmente responsáveis.

Na prática, as duas abordagens não são excludentes, ao contrário, tendem a ser combinadas em processos híbridos que exploram as vantagens de cada método, ampliando as possibilidades de fabricação e o controle sobre as propriedades finais dos nanomateriais obtidos (Khan; Saeed; Khan, 2019; Baig; Kammakakam; Falath, 2021).

4.2 Métodos de caracterização

A caracterização de nanomateriais é etapa fundamental para o entendimento de suas propriedades e para a garantia de qualidade nos processos de síntese e aplicação. A Microscopia de Tunelamento por Varredura (STM) emprega o fenômeno de tunelamento quântico para mapear topografias superficiais com resolução atômica, sendo especialmente útil na análise de estruturas eletrônicas, na identificação de defeitos superficiais e no estudo de fenômenos de adsorção molecular em escala atômica.

A Microscopia de Força Atômica (AFM) utiliza uma ponta de varredura ultrafina acoplada a um microcantiléver (microviga de silício ou nitreto de silício) para medir forças intermoleculares, como forças de van der Waals, eletrostáticas e capilares, e gerar imagens de alta resolução em diferentes modos operacionais (contato, não contato e tapping - modo de contato intermitente).

Essa técnica permite estudar propriedades mecânicas, elétricas e magnéticas de nanomateriais em condições ambientais e em meio líquido, sem exigir preparação elaborada de amostras.





A Espectroscopia Raman, por sua vez, fornece informações sobre vibrações moleculares, modos fonônicos e estrutura cristalina, revelando a composição química, o grau de defeitos e as interações moleculares dos nanomateriais, sendo particularmente valiosa na caracterização de materiais carbonáceos como grafeno e nanotubos de carbono (Kolahalam *et al.*, 2019; Baig; Kammakakam; Falath, 2021).

O controle de qualidade na produção de nanomateriais exige ainda a combinação de múltiplas técnicas complementares. A difração de raios X (XRD) determina a estrutura cristalográfica, o tamanho médio de cristalito e a pureza de fase dos nanomateriais sintetizados. A espectroscopia de energia dispersiva (EDS), frequentemente acoplada à microscopia eletrônica de varredura (SEM), permite a análise elementar qualitativa e semiquantitativa da composição superficial.

Já a microscopia eletrônica de transmissão (TEM) oferece imagens de alta resolução da estrutura interna, incluindo planos cristalinos e interfaces em escala subnanométrica. Em conjunto, essas técnicas asseguram a consistência estrutural e composicional ao longo dos processos de síntese e fabricação em larga escala, sendo indispensáveis para correlacionar as propriedades funcionais dos nanomateriais com sua estrutura e morfologia (Kolahalam *et al.*, 2019; Baig; Kammakakam; Falath, 2021).

5. Aplicações multidisciplinares da nanotecnologia

5.1 Medicina e Biotecnologia

Na área da saúde, a nanomedicina representa uma das vertentes mais promissoras da nanotecnologia. Nanopartículas de liberação controlada de fármacos permitem direcionar terapias a tecidos-alvo com precisão molecular, reduzindo efeitos sistêmicos indesejados e aumentando a biodisponibilidade dos princípios ativos nos sítios de ação.

Nesse contexto, lipossomas, dendrímeros e nanopartículas poliméricas têm sido amplamente investigados como nanoveículos terapêuticos, cada qual com características específicas de encapsulamento, estabilidade e liberação.

Nanoveículos para terapia gênica possibilitam a entrega eficiente de material genético, incluindo DNA plasmidial, RNA mensageiro e RNA de interferência (siRNA), a células específicas, contornando barreiras biológicas e abrindo perspectivas concretas para o tratamento de doenças de base genética, como distrofias musculares, fibrose cística e determinados tipos de câncer hereditário.





No campo diagnóstico, nanossensores baseados em nanopartículas de ouro ou em grafeno oferecem sensibilidade e especificidade superiores para a detecção de biomoléculas, viabilizando diagnósticos precoces de doenças como o câncer por meio da identificação de biomarcadores em concentrações traço no sangue ou em outros fluidos biológicos.

Plataformas de bioimagem baseadas em pontos quânticos e nanopartículas de óxido de ferro superparamagnético ampliam adicionalmente as capacidades de diagnóstico por imagem, com resolução e contraste superiores aos agentes convencionais.

Na engenharia de tecidos, arcabouços nanofibrosos e hidrogéis nanocompósitos são empregados para mimetizar a matriz extracelular, promovendo a adesão, proliferação e diferenciação celular, bem como a liberação controlada de fatores de crescimento, com potencial aplicação em medicina regenerativa e em estratégias de reparo de tecidos ósseo, cartilaginoso e nervoso (Harish *et al.*, 2022; Patra *et al.*, 2018).

5.2 Eletrônica e Computação

A nanotecnologia tem sido central para a miniaturização contínua dos componentes eletrônicos. Transistores de nanotubos de carbono (CNTFETs) apresentam alta mobilidade de portadores de carga e maior tolerância a defeitos do que os transistores de silício convencionais, enquanto transistores de grafeno operam em frequências mais elevadas, sendo promissores para dispositivos de alta velocidade e baixo consumo energético.

No armazenamento de dados, memórias flash baseadas em nanocristais superam os limites de escalabilidade das memórias convencionais, e as memórias de mudança de fase (PCM) exploram a alternância entre estados amorfos e cristalinos para produzir memórias não voláteis de alta velocidade. Na optoeletrônica, LEDs de pontos quânticos e células solares de perovskita representam avanços expressivos em eficiência luminosa e conversão de energia, respectivamente (Das *et al.*, 2021; Ullah *et al.*, 2025).

5.3 Meio ambiente e remediação

Na esfera ambiental, os nanomateriais oferecem contribuições relevantes para a remediação de ambientes contaminados. Nanopartículas de ferro zero valente demonstram eficácia na redução de compostos orgânicos clorados e metais pesados em solos contaminados, por meio de reações de oxirredução que transformam poluentes em



formas menos tóxicas. Na purificação de água, nanofiltros e nanopartículas fotocatalíticas de dióxido de titânio decompõem poluentes orgânicos e eliminam microrganismos patogênicos.

Óxidos metálicos nanoestruturados, como dióxido de titânio (TiO_2), óxido de zinco (ZnO) e óxido de cério (CeO_2), são amplamente empregados como catalisadores na degradação de compostos orgânicos voláteis (COVs) presentes no ar atmosférico, aproveitando a elevada razão entre área superficial e volume característica da nanoescala para maximizar os sítios ativos disponíveis para reações de oxidação.

O mecanismo predominante é a fotocatalise heterogênea, na qual a irradiação luminosa sobre o catalisador gera espécies reativas de oxigênio, como radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), capazes de mineralizar os COVs em dióxido de carbono e água. A dopagem desses óxidos com metais de transição, como ferro e cobre, estende a absorção ao espectro visível e melhora a eficiência catalítica em condições de iluminação natural, tornando essa abordagem uma alternativa viável e economicamente competitiva ao tratamento de efluentes gasosos em ambientes industriais e urbanos.

Sensores nanométricos para monitoramento ambiental possibilitam a detecção precoce e em tempo real de contaminantes em solos, águas e alimentos, ampliando a capacidade de vigilância e controle de processos industriais. A nanotecnologia verde, orientada pela minimização de impactos ambientais, orienta o desenvolvimento de processos industriais mais eficientes, materiais biodegradáveis e tecnologias de remediação com menor geração de resíduos (Xue *et al.*, 2016; Asghar *et al.*, 2024).

5.4 Energia e sustentabilidade

A nanotecnologia exerce papel estratégico na transição energética global. Nanomateriais como nanopartículas plasmônicas aumentam a absorção de luz em células solares convencionais por meio da excitação de ressonância plasmônica de superfície, intensificando o campo eletromagnético local e melhorando a eficiência de conversão fotovoltaica.

As células solares de perovskita, fabricadas com nanomateriais de baixo custo, alcançam eficiências de conversão expressivas, superiores a 26% em configurações de junção única e admitem integração em superfícies flexíveis, ampliando seu potencial de aplicação em arquitetura e eletrônicos portáteis.





O grafeno e os nanotubos de carbono melhoram a capacidade e a durabilidade de baterias de íons de lítio ao atuar como materiais de eletrodo com elevada condutividade elétrica, alta área superficial específica e maior tolerância a ciclos de carga e descarga.

Os supercapacitores nanoestruturados, por sua vez, oferecem maior densidade energética e tempos de carga reduzidos em comparação aos capacitores convencionais, sendo especialmente promissores para aplicações que demandam liberação rápida de energia, como veículos elétricos e sistemas de armazenamento estacionário.

Catalisadores nanoestruturados de platina e de ligas metálicas bimetálicas aprimoram processos de produção e utilização do hidrogênio como combustível limpo, reduzindo a energia de ativação das reações eletroquímicas em células a combustível.

Nanocatalisadores para conversão de CO₂, baseados em óxidos metálicos, pontos quânticos e materiais bidimensionais, contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa ao transformar o dióxido de carbono em combustíveis sintéticos, metanol e outros produtos químicos de valor agregado, integrando assim a nanotecnologia às estratégias de economia circular e descarbonização industrial (Farooq *et al.*, 2024; Ullah *et al.*, 2025; Jia; Lan, 2023).

6. Desafios éticos, regulatórios e de segurança

O avanço da nanotecnologia não está isento de riscos e controvérsias. A avaliação toxicológica de nanopartículas é complexa, pois o comportamento desses materiais em organismos vivos e ecossistemas difere substancialmente do comportamento de suas formas macroscópicas.

Em razão de seu tamanho reduzido, nanopartículas são capazes de atravessar barreiras biológicas, como a barreira hematoencefálica, o epitélio pulmonar e as membranas celulares, atingindo órgãos e tecidos de difícil acesso para compostos convencionais.

Questões como bioacumulação, persistência ambiental, genotoxicidade e potenciais efeitos inflamatórios crônicos sobre a saúde humana demandam investigação sistemática e rigorosa antes da comercialização em larga escala (Ganguly; Breen; Pillai, 2018).

Do ponto de vista ético, a nanotecnologia levanta questões relacionadas à distribuição equitativa de seus benefícios, ao acesso diferenciado entre países



desenvolvidos e em desenvolvimento, e à responsabilidade social das corporações envolvidas no desenvolvimento e na exploração comercial dessas tecnologias.

A ausência de marcos regulatórios específicos e suficientemente robustos em muitos países representa lacuna crítica para a proteção da saúde pública e do meio ambiente, uma vez que os instrumentos jurídicos vigentes foram concebidos para substâncias em escala convencional e nem sempre se aplicam adequadamente aos nanomateriais projetados (engineered).

A implementação de padrões internacionais harmonizados, aliada ao monitoramento contínuo do ciclo de vida dos nanomateriais, da síntese ao descarte e ao investimento em estudos de ecotoxicologia, é condição necessária para que a nanotecnologia avance de forma responsável e sustentável (Asghar *et al.*, 2024).

O diálogo entre cientistas, legisladores, indústria e sociedade civil mostra-se imprescindível nesse processo, sendo a governança participativa um elemento central para assegurar que os riscos sejam geridos com transparência e que os benefícios da nanociência sejam distribuídos de forma justa e inclusiva (Jeevanandam *et al.*, 2018).

7. Considerações finais

A nanotecnologia constitui uma das mais expressivas revoluções científicas e tecnológicas em curso, cujo impacto transversal se estende pela medicina, biotecnologia, eletrônica, computação, meio ambiente e energia.

A presente revisão evidenciou que as propriedades únicas dos nanomateriais, decorrentes dos efeitos quânticos e da elevada razão entre área superficial e volume característicos da nanoescala, fundamentam aplicações inovadoras que abrem horizontes antes inalcançáveis para o enfrentamento de problemas complexos da sociedade contemporânea.

No campo da saúde, os avanços em nanomedicina apontam para terapias mais precisas, diagnósticos mais sensíveis e estratégias regenerativas de grande potencial clínico. Na eletrônica, a miniaturização viabilizada por nanomateriais como grafeno e nanotubos de carbono redefine os limites da computação e do armazenamento de dados.

Na esfera ambiental, nanomateriais para remediação e monitoramento representam contribuições relevantes para a proteção dos ecossistemas. No setor energético, a nanotecnologia impulsiona a transição para matrizes renováveis por meio



de células solares mais eficientes, sistemas de armazenamento de energia aprimorados e catalisadores de menor impacto ambiental.

A revisão revelou, contudo, que tais benefícios são acompanhados por desafios igualmente significativos. A complexidade da avaliação toxicológica dos nanomateriais, a ausência de marcos regulatórios suficientemente robustos e as assimetrias no acesso às tecnologias emergentes entre países desenvolvidos e em desenvolvimento configuram obstáculos que não podem ser negligenciados.

O avanço responsável da nanociência exige, portanto, abordagens interdisciplinares, investimento sistemático em ecotoxicologia e governança científica participativa, que integre academia, indústria, poder público e sociedade civil.

Como limitação do presente estudo, destaca-se o caráter narrativo da revisão, que não permite inferências estatísticas sobre a produção científica da área nem o mapeamento exaustivo de todas as subáreas da nanotecnologia.

Pesquisas futuras poderiam aprofundar a análise de domínios específicos, como nanotoxicologia, regulamentação comparada entre países ou nanotecnologia verde, empregando metodologias de revisão sistemática e bibliometria para delinear com maior precisão o estado da arte e as lacunas de conhecimento ainda existentes.

8 Referências

ASGHAR, N. *et al.* Advancement in nanomaterials for environmental pollutants remediation: a systematic review on bibliometrics analysis, material types, synthesis pathways, and related mechanisms. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 22, n. 26, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12951-023-02151-3>. Acesso em: 6 maio 2026.

BAIG, N.; KAMMAKAKAM, I.; FALATH, W. Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. **Materials Advances**, v. 2, n. 6, p. 1821–1871, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D0MA00807A>. Acesso em: 15 abr. 2026.

CURL, R. F.; KROTO, H. W.; SMALLEY, R. E. C60: Buckminsterfullerene. *Nature*, v. 318, n. 6042, p. 162–163, 1985.

DAS, S. *et al.* Transistors based on two-dimensional materials for future integrated circuits. **Nature Electronics**, v. 4, n. 11, p. 786–799, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00670-1>. Acesso em: 10 maio 2026.

DREXLER, K. E. *Engines of creation: the coming era of nanotechnology*. New York: Anchor Books, 1986.



FAROOQ, N. *et al.* Nanomaterial-based energy conversion and energy storage devices: a comprehensive review. **New Journal of Chemistry**, v. 48, p. 8933–8962, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D3NJ04846B>. Acesso em: 10 maio 2026.

FEYNMAN, R. P. There's plenty of room at the bottom. *Engineering and Science*, v. 23, n. 5, p. 22–36, 1960.

GANGULY, P.; BREEN, A.; PILLAI, S. C. Toxicity of nanomaterials: exposure, pathways, assessment, and recent advances. **ACS Biomaterials Science & Engineering**, v. 4, n. 7, p. 2237–2275, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.8b00068>. Acesso em: 18 abr. 2026.

GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. The rise of graphene. *Nature Materials*, v. 6, p. 183–191, 2007.

HARISH, V. *et al.* Review on nanoparticles and nanostructured materials: bioimaging, biosensing, drug delivery, tissue engineering, antimicrobial, and agro-food applications. **Nanomaterials**, v. 12, n. 3, p. 457, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano12030457>. Acesso em: 20 maio 2026.

IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, v. 354, p. 56–58, 1991.

JEEVANANDAM, J. *et al.* Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. **Beilstein Journal of Nanotechnology**, v. 9, p. 1050–1074, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.98>. Acesso em: 28 maio 2026.

JIA, J.; LAN, Y. Synthesis, characterization, and applications of nanomaterials for energy conversion and storage. **Molecules**, v. 28, n. 21, p. 7383, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules28217383>. Acesso em: 25 maio 2026.

KHAN, I.; SAEED, K.; KHAN, I. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 12, n. 7, p. 908–931, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>. Acesso em: 28 maio 2026.

KOLAHALAM, L. A. *et al.* Review on nanomaterials: synthesis and applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 18, p. 2182–2190, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.371>. Acesso em: 8 abr. 2026.

NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE (NNI). **What is nanotechnology?** [S.d.]. Disponível em: <https://www.nano.gov>. Acesso em: 4 abr. 2026.

OMEIZA, L. A. *et al.* Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 20, n. 262, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01477-8>. Acesso em: 27 maio 2026.

PATRA, J. K. *et al.* Nano based drug delivery systems: recent developments and future prospects. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 16, n. 71, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12951-018-0392-8>. Acesso em: 20 maio 2026.





ROTHER, E. T. Revisão sistemática x revisão narrativa. *Acta Paulista de Enfermagem*, v. 20, n. 2, p. v–vi, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-21002007000200001>. Acesso em: 8 abr. 2026.

TANIGUCHI, N. On the basic concept of nanotechnology. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING, Tokyo, 1974. p. 18–23.

ULLAH, K. *et al.* Perovskite nanocrystals, quantum dots, and two-dimensional structures: synthesis, optoelectronics, quantum technologies, and biomedical imaging. *Nanomaterials*, v. 16, n. 1, p. 30, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano16010030>. Acesso em: 12 maio 2026.

XUE, X. *et al.* Nanomaterials for water pollution monitoring and remediation. *Environmental Chemistry Letters*, v. 14, n. 2, p. 269–281, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0595-x>. Acesso em: 23 maio 2026.

