

2^o CICS

CONGRESSO
INTERNACIONAL
CIÊNCIA E SOCIEDADE

Educação e Pesquisa como
caminho para pacificação global

TRABALHOS
PREMIADOS
2025



CENTRO UNIVERSITÁRIO
SANTO AGOSTINHO





TRABALHOS PREMIADOS 2025





CENTRO UNIVERSITÁRIO SANTO AGOSTINHO – UNIFSA
PRÓ-REITORIA DE ENSINO
DIRETORIA DE ENSINO
NÚCLEO DE PUBLICAÇÕES ACADÊMICAS - NPA

Supervisão Editorial: Ana Kelma Cunha Gallas
Diagramação: Edson Rodrigues Cavalcante
Design Gráfico e artes: Ana Kelma Cunha Gallas
Capa: Odrânio Rocha
TI OMP Books: Eliezyo Silva



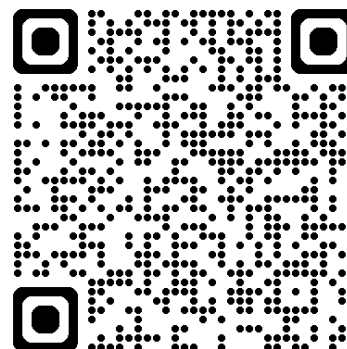
LESTU EDITORA, CONSULTORIA E
COMUNICAÇÃO LTDA
Contato: editora@lestu.org
Site: www.lestu.com.br
Livraria: www.lestu.org

Este título possui uma licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives* 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).

A íntegra dessa licença pode ser acessada:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.pt>

© 2025 UNIFSA/LESTU

Todos os capítulos deste livro foram submetidos, aprovados e apresentados no 2º Congresso Internacional Ciência e Sociedade, realizado pelo Centro Universitário Santo Agostinho de 4 a 8 de novembro de 2025, sendo selecionados como os melhores trabalhos apresentados em Grupos Temáticos do evento.



FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

T279 GALLAS, Ana Kelma Cunha; GOMES, Alisson Dias; CRONEMBERGER, Izabel Herika Gomes Matias; LIRA E SILVA, Antonieta; OLIVEIRA, Edjôfre Coelho de; SILVA, Indira Maria de Melo Lira Pereira da (ORGs.).

Trabalhos premiados no 2º Congresso Internacional Ciência e Sociedade: Educação e Pesquisa como caminho para a pacificação global. Teresina: Centro Universitário Santo Agostinho (UNIFSA); Editora Lestu, 2025.

432 p. *online*.

ISBN: 978-65-85729-14-7

DOI: doi.org/10.51205/lestu.978-65-85729-14-7

Disponível em: <https://lestu.org/books/>

1. Congresso Internacional Ciência e Sociedade. 2. Pesquisa. 3. Inovação. 4. Sustentabilidade. 5. Ciência e Sociedade. I. Autores. IV. Congresso Internacional Ciência e Sociedade (2. : 2025 : Teresina, PI).

CDD: 370

15

A NANOTECNOLOGIA NA FORMULAÇÃO DE AGENTES ANTIMICROBIANOS COMO ESTRATÉGIA NO COMBATE ÀS SUPERBACTÉRIAS: UMA REVISÃO INTEGRATIVA¹

NANOTECHNOLOGY IN THE FORMULATION OF ANTIMICROBIAL AGENTS AS A STRATEGY IN THE FIGHT AGAINST SUPERBUGS: AN INTEGRATIVE REVIEW

Sofia Costa Xavier – UNIFACEMA²
Felipe André Oliveira Costa – UESPI³
Karine Araújo de Souza – UNIFACEMA⁴
Dainesy Santos Martins⁵ – UNIFACEMA⁵

¹ Trabalho apresentado no GT 26 INTEGRAÇÃO E INOVAÇÃO EM SAÚDE: ABORDAGENS E TENDÊNCIAS MULTIDISCIPLINARES PARA A PREVENÇÃO E TRATAMENTO DE DOENÇAS do 2º Congresso Internacional Ciência e Sociedade (2º CICS 2025), promovido pelo Centro Universitário Santo Agostinho, de 04 a 08 de novembro de 2025, em Teresina-PI.

² Graduanda em Biomedicina (UNIFACEMA). E-mail: sofiacostaxavierc@gmail.com

³ Graduando em Medicina (UESPI). Email: felipeandrecx@gmail.com

⁴ Graduanda em Biomedicina (UNIFACEMA). E-mail: karinnesouza265@gmail.com

⁵ Doutora em Ciências-Bioquímica (UFPR). Professora do Centro Universitário de Ciências e Tecnologia do Maranhão (UNIFACEMA). E-mail: dainesy.martins@unifacema.edu.br

RESUMO

Infecções por superbactérias constituem atualmente um dos maiores problemas de saúde global. Estratégias para superar a resistência bacteriana ainda enfrentam desafios, incluindo o surgimento de cepas multirresistentes e potenciais efeitos tóxicos. A nanotecnologia, que envolve a manipulação de partículas em escala nanométrica (1–100 nm), surge como uma alternativa promissora na prevenção e tratamento de infecções, embora haja preocupações quanto a possíveis efeitos adversos à saúde, como neurotoxicidade e potenciais efeitos genotóxicos ou teratogênicos. A presente revisão teve como objetivo identificar, descrever e analisar o uso de nanopartículas na formulação de compostos antimicrobianos. A busca por artigos científicos foi conduzida de forma sistematizada nas bases de dados Biblioteca Virtual em Saúde (BVS), PubMed e Scientific Electronic Library Online (SciELO), utilizando descritores em Ciências da Saúde (DeCS-BIREME), incluindo “Drug Resistance, Microbial”, “Nanotechnology”, “Nanostructures”, “Nanomedicine” e “Anti-Infective Agents”, combinados às palavras-chave “Antimicrobial Agent”, “Antibiotic Resistance” e “Antibacterials”. Ao todo, onze artigos atenderam aos critérios de inclusão. Os resultados indicam que diversas nanopartículas metálicas - incluindo prata (AgNPs), cobre (CuNPs), óxido de zinco (ZnO-NPs) e dióxido de silício (SiO₂-NPs)-, podem potencializar a eficácia de antibióticos contra bactérias resistentes, como aquelas resistentes a carbapenêmicos, além de exercer ação bactericida direta por meio de mecanismos como estresse oxidativo e danos a proteínas e ácidos nucleicos bacterianos. De forma geral, com os avanços da ciência e da tecnologia, os nanomateriais têm o potencial de superar limitações dos fármacos convencionais e ampliar aplicações antimicrobianas, contribuindo para o combate futuro a bactérias multirresistentes (MDR).

Palavras-Chave: NANOMEDICAMENTO. NANOMATERIAIS. ANTIBIÓTICOS. CONJUGADOS.

ABSTRACT

Infections caused by superbugs currently constitute one of the greatest global health challenges. Strategies to overcome bacterial resistance still face significant obstacles, including the emergence of multidrug-resistant strains and potential toxic effects. Nanotechnology, which involves the manipulation of particles at the nanometer scale (1–100 nm), has emerged as a promising alternative for the prevention and treatment of infections, although concerns remain regarding possible adverse health effects, such as neurotoxicity and potential genotoxic or teratogenic effects. The present review aimed to identify, describe, and analyze the use of nanoparticles in the formulation of antimicrobial compounds. A systematic search for scientific articles was conducted in the Virtual Health Library (BVS), PubMed, and Scientific Electronic Library Online (SciELO) databases, using Health Sciences descriptors (DeCS-BIREME), including “Drug Resistance, Microbial,” “Nanotechnology,” “Nanostructures,” “Nanomedicine,” and “Anti-Infective Agents,” combined with the keywords “Antimicrobial Agent,” “Antibiotic Resistance,” and “Antibacterials.” A total of eleven articles met the inclusion criteria. The results indicate that various metallic nanoparticles - including silver (AgNPs), copper (CuNPs), zinc oxide (ZnO-NPs), and silicon dioxide (SiO₂-NPs) - can enhance the efficacy of antibiotics against resistant bacteria, such as carbapenem-resistant strains, in addition to exerting direct bactericidal activity through mechanisms such as oxidative stress and damage to bacterial proteins and nucleic acids. Overall, with advances in science and technology, nanomaterials have the potential to overcome the limitations of conventional drugs and expand antimicrobial applications, contributing to the future fight against multidrug-resistant (MDR) bacteria.

Keywords: NANOMEDICINE. NANOMATERIALS. ANTIBIOTICS. CONJUGATES.

INTRODUÇÃO

O advento dos agentes antimicrobianos, especialmente os antibióticos, revolucionou a medicina no século XX, reduzindo a mortalidade por doenças como tuberculose, sífilis e pneumonia. No entanto, a ampla disseminação desses fármacos, aliada à prescrição excessiva, inadequada e ao uso indiscriminado pela população, resultou em um crescimento contínuo de microrganismos multirresistentes, estimando-se cerca de dez milhões de óbitos associados a infecções resistentes até 2050 (BARAN et al., 2023).

Embora a resistência microbiana também seja observada em fungos, protozoários e vírus, as bactérias representam o maior desafio, particularmente aquelas resistentes a múltiplos antibióticos. Destacam-se, nesse contexto, as bactérias multirresistentes do grupo “ESKAPE” (*Enterococcus faecium*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Acinetobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa* e *Enterobacter* spp.), associadas às infecções relacionadas à assistência à saúde (IRAS) e cada vez mais identificadas em reservatórios ambientais (DENISSEN et al., 2022).

Diversos são os mecanismos que condicionam a resistência bacteriana, entre eles a aquisição de genes de resistência, a produção de enzimas capazes de inativar antibióticos - como as betalactamases -, o uso de bombas de efluxo e a formação de biofilmes. Estratégias como o desenvolvimento de novos antibióticos, o aumento da dose e a combinação de diferentes fármacos foram adotadas para superar essa resistência; no entanto, ainda estão associadas ao surgimento de cepas multirresistentes e a efeitos tóxicos (WANG et al., 2017).

Infecções por superbactérias são atualmente um dos maiores problemas globais de saúde em nossa sociedade. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), superbactérias ou infecções bacterianas patogênicas resistentes a múltiplos medicamentos são responsáveis por mais de 4,95 milhões de mortes todos os anos (WHO, 2022). Além disso, de forma preocupante, as superbactérias estão se tornando resistentes a um novo tipo de antibiótico mais rápido do que os antibióticos estabelecidos em clínicas e, como resultado, nenhuma nova classe de antibióticos esteve no mercado nos últimos 30 anos (WANG et al., 2023).

Tendo em vista a necessidade de inovação na pesquisa e desenvolvimento (P&D) de antibióticos eficazes contra bactérias multirresistentes, a nanotecnologia é considerada uma alternativa promissora para o tratamento e prevenção de infecções. A nanotecnologia

envolve a manipulação de partículas em escala nanométrica (1–100 nm) para desenvolver dispositivos aplicáveis a diferentes setores industriais. Dessa forma, a manipulação dessas nanopartículas, quanto à sua forma, tamanho e propriedades, é de grande utilidade no campo biomédico (BAYDA et al., 2019).

A aplicação dessa tecnologia na terapêutica encontra-se consolidada na formulação de nanomedicamentos à base de lipossomas, como o Doxil®, uma formulação lipossomal da doxorubicina (1995), e o Vyxeos®, lipossoma contendo daunorrubicina/citarabina (2017), ambos com sucesso em terapias contra o câncer (ZOU et al., 2023). Entretanto, apesar do potencial terapêutico, há uma preocupação significativa quanto a possíveis efeitos adversos à saúde, incluindo neurotoxicidade e potenciais efeitos genotóxicos ou teratogênicos, o que reforça a necessidade de mais pesquisas nessa área e de regulamentações eficazes para garantir a segurança desses compostos (SOUZA et al., 2023).

Considerando os avanços da nanotecnologia aplicada à saúde, denominada nanomedicina, e sua relevância para o desenvolvimento de novos agentes antimicrobianos diante do crescente desafio da resistência bacteriana aos antibióticos convencionais, a presente revisão tem por objetivo sintetizar e analisar as evidências disponíveis acerca da eficácia e das limitações dessas aplicações, destacando seu potencial como estratégia inovadora no enfrentamento de microrganismos resistentes.

METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura com abordagem descritivo-analítica e qualitativa. Esse delineamento permite a integração de diferentes abordagens metodológicas, ampliando a compreensão do fenômeno e fornecendo uma síntese crítica e atualizada da produção científica (SOUZA et al., 2010). Utilizou-se a estratégia PICO (Problema/População, Intervenção, Comparativo, Outcome/Desfecho) para estruturar a questão norteadora: “Qual o papel da nanotecnologia na superação da resistência microbiana no desenvolvimento de antimicrobianos?”. Nesse contexto, o “Problema” corresponde a bactérias multirresistentes (MDR), a “Intervenção” refere-se ao uso de nanomateriais no desenvolvimento de antimicrobianos, e o “Desfecho” abrange a redução da resistência bacteriana e o aumento da eficácia antimicrobiana.

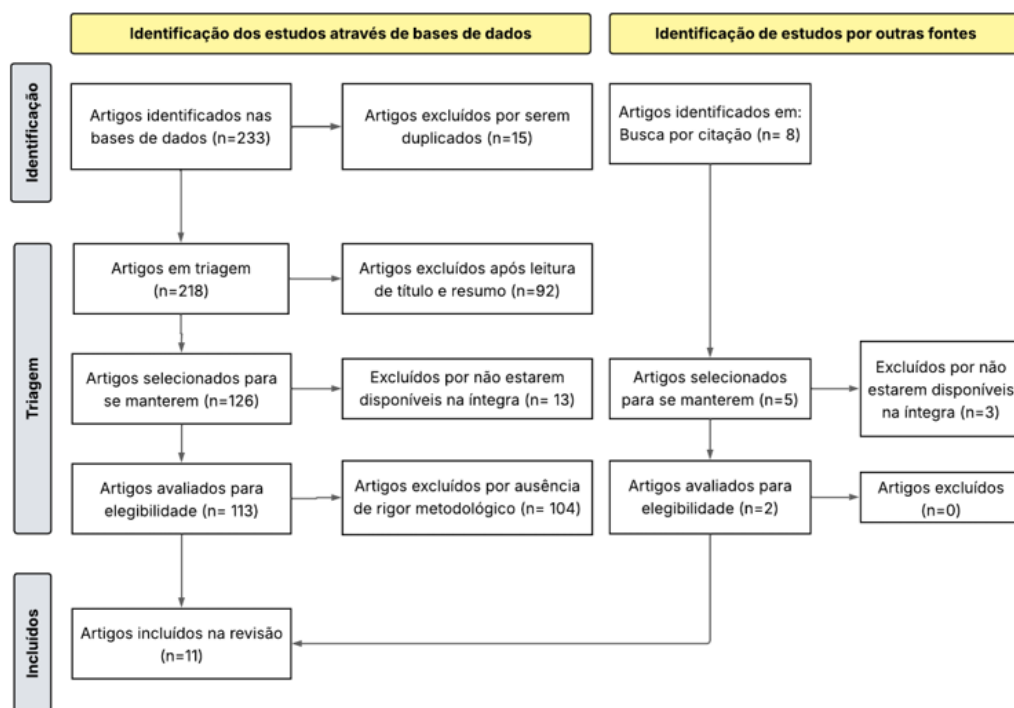
Foi utilizado o instrumento Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and

Meta-Análises (PRISMA), ferramenta para garantir a transparência e reprodutibilidade do estudo (GALVÃO et al., 2022). A busca por artigos científicos foi conduzida nas bases de dados da Biblioteca Virtual em Saúde (BVS), PubMed e Scientific Electronic Library Online (SciELO) em julho de 2025, utilizando-se estratégias de busca direcionadas para cada bases de dados. Além disso, a busca foi complementada pela análise de citações, a fim de identificar artigos relevantes para a temática.

A seleção dos descritores baseou-se na terminologia disponível nos Descritores em Ciências da Saúde (DeCS-BIREME), sendo eles: “Drug Resistance, Microbial”, “Nanotechnology”, “Nanostructures”, “Nanomedicine” e “Anti-Infective Agents”. Esses descritores foram combinados às palavras-chave “Antimicrobial Agent”, “Antibiotic Resistance” e “Antibacterials” e aos seus correspondentes em português, por meio dos operadores booleanos AND e OR.

Foram adotados como critérios de inclusão: artigos publicados entre 2020 e 2025, redigidos em inglês, português ou espanhol, disponíveis na íntegra. Os critérios de exclusão compreenderam: artigos duplicados, não disponíveis em texto completo, que não abordavam diretamente os principais aspectos do tema, publicados fora do período estabelecido e que apresentavam ausência de detalhamento metodológico.

FIGURA 1. Fluxograma de identificação, seleção e inclusão dos artigos para revisão integrativa segundo PRISMA (2020).



Fonte: Autoria própria, 2025.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram inicialmente avaliados 115 artigos quanto à elegibilidade, dos quais apenas onze atenderam aos critérios de inclusão, sendo cinco estudos experimentais e seis revisões sistemáticas. Os estudos revelam um interesse crescente na aplicação de nanopartículas (NPs) como agentes antimicrobianos, decorrente de suas propriedades físico-químicas singulares - incluindo o tamanho reduzido, a diversidade estrutural e a alta área superficial e reatividade - que possibilitam múltiplas estratégias de uso e influenciam diretamente na sua eficácia (GIRMA et al., 2024; MENDOZA et al., 2021; ALGADI et al., 2024; MORADI et al., 2023).

As nanoformulações com atividade antibacteriana mais investigadas incluem nanopartículas inorgânicas - como metais puros (ouro, prata e cobre), sais e óxidos metálicos -, bem como nanopartículas poliméricas e formulações lipídicas em escala nanométrica, como lipossomas e nanoemulsões (AL-AWSI et al., 2023). Os achados

sugerem que cada classe apresenta vantagens específicas: as nanopartículas metálicas, em especial as de prata, cobre e óxido de zinco, têm se destacado pela forte atividade antimicrobiana e pela capacidade de inibir biofilmes, embora sua toxicidade potencial ainda demande investigação. Já os sistemas lipídicos, como os lipossomas, oferecem benefícios relacionados à encapsulação de altas concentrações de antibióticos, maior estabilidade e direcionamento seletivo, reduzindo efeitos adversos. Enquanto as nanopartículas poliméricas, por sua vez, combinam biocompatibilidade e versatilidade, sendo promissoras para liberação controlada de fármacos (Tabelas 1 e 2).

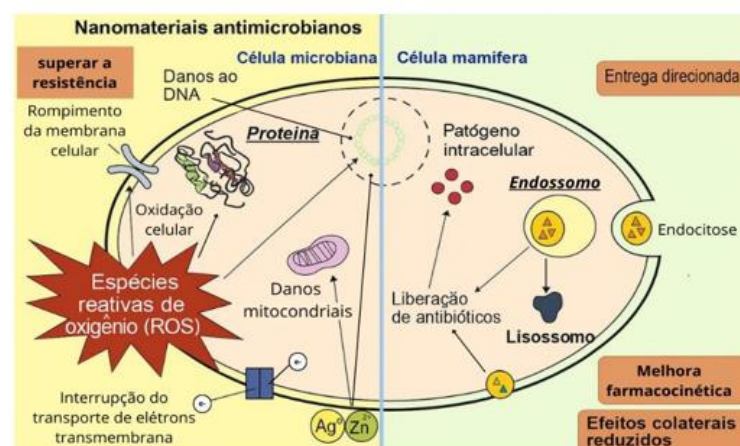
Nesse contexto, observa-se que a diversidade de plataformas nanoestruturadas não apenas amplia as estratégias de combate a microrganismos multirresistentes, mas também aponta para abordagens sinérgicas que unem efeito antimicrobiano direto e veiculação de antibióticos, ampliando o potencial terapêutico e a eficácia antimicrobiana. Contudo, a ausência de padronização nos métodos de síntese e avaliação, somada às incertezas relacionadas à biocompatibilidade em longo prazo e à toxicidade, permanece como um dos principais desafios para a aplicação clínica sistêmica dessas nanopartículas em medicamentos (HOLT-TORRES et al., 2023).

O desempenho antimicrobiano dessas estruturas é atribuído a diferentes mecanismos de ação, incluindo a indução de estresse oxidativo, danos à membrana celular,

desintegração da parede bacteriana, inativação de proteínas essenciais e consequente perturbação do metabolismo microbiano, bem como possíveis danos diretos aos ácidos nucleicos. No caso das nanopartículas carreadoras de fármacos, destaca-se ainda a capacidade de fusão com a membrana celular, o que favorece a penetração de antibióticos em locais de difícil acesso, como biofilmes, e ainda o combate a patógenos intracelulares, contribuindo para superar barreiras associadas à resistência terapêutica (Figura 1).

Dentre os estudos experimentais analisados, destacam-se aqueles envolvendo nanopartículas de óxidos metálicos. Rasha et al. (2021) demonstraram que ZnO-NPs obtidas por síntese biológica apresentaram potente atividade antibacteriana in vitro e, em modelos in vivo, promoveram aceleração significativa da cicatrização de feridas (96%) em ratos infectados com *Klebsiella pneumoniae* produtora de carbapenemase (KPC). De forma semelhante, Sen e Sarkar (2021) observaram que nanopartículas de óxido de cobre (CuNPs) apresentaram ação tanto biocida quanto anti-biofilme, além de efeito cicatrizante relevante em feridas de ratos Wistar infectados com *Enterobacter sp.* e *Klebsiella sp.*, bactérias críticas frequentemente associadas a infecções de difícil tratamento devido à escassez de antibióticos eficazes. As feridas tratadas com o unguento contendo CuNPs cicatrizaram completamente em 13 dias, enquanto as não tratadas permaneceram ~40% abertas.

FIGURA 1. Mecanismos antimicrobianos de nanomateriais.



Fonte: HUH, Ae Jung; KWON, Young Jik, 2011. (Adaptado pelos autores)

Thomaz et al. (2020) verificaram que AgNPs biogênicas conferiram 80% de proteção a larvas de *Galleria mellonella* infectadas com *Pseudomonas aeruginosa*, uma taxa de sobrevivência significativamente superior à observada em larvas não tratadas. O efeito

ocorreu tanto pela ação direta sobre a bactéria quanto pela modulação da resposta imune do hospedeiro, restaurando a contagem de células de defesa (hemócitos) a níveis normais. Em outra aplicação, Oliveira et al. (2023) investigou nanopartículas de N-TiO₂ conjugadas com ácido fólico (N-TiO₂-FA) e confirmou seu efeito bactericida e anti-biofilme sob luz UV contra MRSA e *P. aeruginosa*, concluindo que a conjugação com ácido fólico potencializou a eficácia do nanomaterial.

As nanoformulações com ação bactericida apresentam grande potencial de aplicação industrial no combate a bactérias resistentes associadas à contaminação de produtos alimentícios e ao risco de infecções. Nesse contexto, Souza et al. (2023) demonstraram que a síntese verde de nanopartículas de prata (AgNPs), utilizando extratos de *Lippia origanoides* e *Hymenaea martiana*, potencializa notavelmente a atividade antimicrobiana dos compostos vegetais, conferindo-lhes eficácia bactericida contra uma ampla gama de bactérias Gram-positivas e Gram-negativas relevantes para a indústria de laticínios, mesmo em baixas concentrações. Além disso, as AgNPs preveniram a formação de biofilmes e eliminaram 99% das populações bacterianas em apenas 30 minutos, alcançando 100% de inibição do crescimento microbiano em uma hora. Dessa forma, o estudo posiciona estas AgNPs como uma alternativa promissora e de ação rápida aos sanitizantes convencionais, alinhada aos princípios da química verde, para combater a contaminação e a resistência bacteriana em superfícies industriais.

O desempenho antimicrobiano das AgNPs e CuNPs, avaliado por Mendoza et al. (2021), evidencia o potencial dessa tecnologia como estratégia contra bactérias resistentes, mostrando que a eficácia é modulada por fatores físico-químicos, como o tamanho reduzido e o formato esférico, que maximizam a interação com a célula bacteriana, sendo a atividade geralmente mais pronunciada contra bactérias Gram-negativas. A inovação central do estudo está na exploração de diferentes formulações para otimizar a aplicação: enquanto a síntese verde com extratos vegetais potencializa a ação saneante em superfícies industriais, a formulação em sulfeto de prata (Ag₂S) destaca-se por sua elevada biocompatibilidade (alta eficácia antimicrobiana e baixa citotoxicidade), configurando-se como candidata ideal para aplicações em biomateriais de contato direto e prolongado com o corpo humano, como próteses, implantes dentários, cateteres e curativos avançados, nos quais a prevenção de infecções é fundamental.

TABELA 1. Síntese dos principais achados dos estudos experimentais.

Referência	Tipo de NPs	Alvo bacteriano resistente	Efeito antibacteriano	Conclusões
SEN et al. (2021)	Óxido de Cobre (CuNPs) biocompatíveis.	<i>Enterobacter sp.</i> e <i>Klebsiella sp.</i> resistentes a carbapenêmicos.	In vitro: Ação bactericida e anti-biofilme. In vivo: Prevenção de infecção e aceleração da cicatrização de feridas.	As CuNPs são promissoras como terapia de baixo custo para infecções de feridas por bactérias multirresistentes, combinando ação biocida com a promoção da cicatrização.
RASHA et al. (2021)	Óxido de Zinco (ZnO-NPs) de síntese biológica.	<i>Klebsiella pneumoniae</i> resistente a carbapenêmicos (KPC).	In vitro: Forte atividade antibacteriana. In vivo: Aceleração da cicatrização de feridas (96%) e redução da inflamação em ratos.	As ZnO-NPs biossintetizadas são uma alternativa promissora aos antibióticos para tratar infecções por KPC, mostrando alta eficácia e promovendo a recuperação de feridas.
THOMAZ et al. (2020)	Prata (AgNPs) de síntese biológica.	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> .	In vitro: Forte atividade bactericida. In vivo: Proteção de 80% das larvas infectadas, eliminando a bactéria e regulando a resposta imune.	As AgNPs biogênicas têm forte atividade protetora contra infecções por <i>P. aeruginosa</i> , agindo diretamente na bactéria e modulando a resposta imune do hospedeiro.
OLIVEIRA et al. (2023)	N-TiO ₂ conjugado com Ácido Fólico (N-TiO ₂ -FA).	MRSA e <i>P. aeruginosa</i> .	Efeito bactericida e anti-biofilme sob luz UV, com danos confirmados à membrana bacteriana.	As NPs de N-TiO ₂ -FA são agentes antimicrobianos e anti-biofilme biocompatíveis e promissores, com eficácia potencializada pela conjugação com ácido fólico.
SOUSA et al. (2023)	Prata (AgNPs) de síntese biológica.	Bactérias comuns em laticínios (<i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>Salmonella</i> , etc.).	Forte ação bactericida e anti-biofilme, especialmente na prevenção da formação. Eficaz em superfícies de inox e polietileno.	As AgNPs de síntese verde são uma alternativa promissora para a higienização na indústria de alimentos, sendo eficazes em superfícies industriais e na prevenção de biofilmes.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Adicionalmente, uma revisão abrangente de Girma et al. (2024), que reuniu vinte e sete artigos originais, destacou a eficácia de nanopartículas (NPs) inorgânicas, como as de prata (Ag), ouro (Au) e óxido de zinco (ZnO), contra uma ampla gama de bactérias patogênicas de origem alimentar, abrangendo tanto Gram-positivas quanto Gram-negativas. Entre os principais mecanismos de ação, incluem-se a adsorção à superfície celular e formação de poros com consequente ruptura da membrana e morte celular, bem como a geração de radicais livres altamente reativos, principalmente radicais hidroxila, que causam estresse oxidativo e danificam componentes vitais às células bacterianas, como DNA, proteínas e lipídeos.

Os estudos indicam que as nanopartículas apresentam atividade antimicrobiana multifatorial, atuando simultaneamente sobre diferentes alvos bacterianos, como membrana plasmática, DNA, proteínas e enzimas essenciais. Essa característica dificulta o

desenvolvimento de mutações que confirmam resistência de forma concomitante, o que contrasta com os antibióticos convencionais, geralmente direcionados a um único alvo molecular e, portanto, mais suscetíveis ao surgimento de resistência por mutações pontuais ou aquisição de genes específicos, o que reforça o potencial das nanopartículas como alternativa promissora para superar a resistência antimicrobiana.

A revisão de Moradi et al. (2023) catalogou um amplo arsenal de 19 tipos diferentes de nanomateriais com ação antibacteriana, incluindo NPs de cobre, prata, ouro, titânio, zinco, selênio e compósitos como Au/Ag, e, de forma particularmente relevante, identificou sete tipos com ação antibiofilme (Ag, ZnO, Au/Ag, grafeno, Cu, Fe₃O₄), demonstrando que a nanotecnologia oferece uma variedade extensa de soluções, não se limitando a um único material.

TABELA 2. Principais achados dos artigos de revisão sistemática incluídos.

Referência	Tipos de NP e Síntese	Patógenos e Resultado Principal	Mecanismos e Fatores Chave
GIRMA et al. (2024)	NPs: Prata (Ag), Óxido de Zinco (ZnO), Ouro (Au), entre outras. Síntese: Química e Biológica.	Alvos: Patógenos alimentares Gram-positivos e Gram-negativos. Resultado: NPs inorgânicas são eficazes, com maior atividade contra bactérias Gram-negativas.	Mecanismos: Dano à membrana celular, ao DNA e produção de estresse oxidativo. Fatores: Tamanho pequeno, formato esférico e alta concentração aumentam a eficácia.
MENDOZA et al. (2021)	NP: Sulfeto de Prata (Ag ₂ S), incluindo pontos quânticos (QDs) e nanocompósitos. Síntese: Precursores como nitrato de prata e fontes de enxofre (tioureia, tioacetamida).	Alvos: Microrganismos Gram-positivos (<i>S. aureus</i>) e Gram-negativos (<i>E. coli</i>). Resultado: As nanoestruturas de Ag ₂ S inibem o crescimento de ambos os tipos de bactérias.	Mecanismos: Não especificado, pois o foco é em aplicação e biocompatibilidade. Fatores: O tamanho da partícula influencia a biocompatibilidade, mas não o efeito inibitório.
ALGADI et al. (2024)	NPs: Nanopartículas de Metal (ex: Ag, Au) e Óxido Metálico (ex: CuO, ZnO, TiO ₂). Síntese: Não especificado, pois o foco é na aplicação.	Alvos: Bactérias formadoras de biofilme, incluindo cepas multirresistentes (MDR). Resultado: As NPs de metal e óxido metálico são eficazes na inibição e desagregação de biofilmes bacterianos, superando os antibióticos convencionais.	Mecanismos: Estresse oxidativo (ROS), dano à parede celular e liberação de íons. Fatores: Tipo, formato, tamanho e concentração da NP; sinergia com antibióticos.

MORADI et al. (2023)	NPs: Grande variedade de metais (Ag, Au, Cu) e óxidos metálicos (TiO₂, ZnO, Fe₃O₄), além de NPs bimetálicas (Au/Ag, Au/Pt) e Grafeno. Síntese: Diversos métodos, incluindo síntese "verde" com extratos de plantas.	Alvos: Bactérias multirresistentes (MDR), como MRSA e VRE, e seus biofilmes. Resultado: Nanomateriais demonstram forte atividade antibacteriana e anti-biofilme, sendo candidatos promissores para superar a resistência aos antibióticos.	Mecanismos: Estresse oxidativo (produção de ROS), dano à membrana celular, inibição de enzimas e de síntese de proteínas e ácidos nucleicos. Fatores: Tipo, tamanho, formato e carga da NP; sinergia com antibióticos; e irradiação de luz (UV, NIR) para potencializar o efeito.
ALGADI et al. (2025)	NPs: Óxido de Cálcio (CaO) e Óxido de Silício (SiO₂). Síntese: Diversos métodos, incluindo precipitação química, ablação a laser e síntese verde.	Alvos: Bactérias Gram-positivas e Gram-negativas, incluindo cepas resistentes a antibióticos. Resultado: Ambas as NPs demonstram forte atividade antibacteriana e anti-biofilme, sendo promissoras para o controle de infecções.	Mecanismos: Geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), ruptura da membrana celular e, no caso do SiO₂, aprimoramento da entrega de fármacos. Fatores: Efeito potencializado pela combinação com outras NPs (ex: Ag, ZnO) ou antibióticos, mostrando forte sinergia.
ABDALLAH et al. (2024)	NPs: Nanoencapsulados, como NPs de prata (AgNPs) e óxido de zinco (ZnO), combinados com antibióticos. Síntese: Foco na encapsulação (ex: quitosana, ácido hialurônico).	Alvos: Bactérias Gram-negativas com resistência a carbapenêmicos, principalmente <i>Acinetobacter baumannii</i> e <i>Pseudomonas aeruginosa</i>. Resultado: Nano-antibióticos reduzem carga bacteriana e aumentam sobrevivência de modelos animais, superando antibióticos isolados.	Mecanismos: NPs como nanocarreadores aumentam penetração e liberação sustentada de antibióticos, melhorando eficácia. Fatores: Encapsulação do antibiótico em NPs é crucial.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

De forma similar, Algadi et al. (2024) relataram que NPs metálicas e de óxidos metálicos superaram os antibióticos convencionais por meio de mecanismos como estresse oxidativo e liberação de íons, com destaque para a ação antibiofilme. Esses mecanismos promovem a inibição da adesão, penetração e destruição da matriz extracelular (EPS), além de atacarem as células persistentes dentro do biofilme, indicando que as nanopartículas têm potencial para superar uma das principais causas de infecções crônicas e persistentes, frequentemente associadas à falha dos tratamentos convencionais com antibióticos.

Algadi et al. (2025) demonstram que diferentes nanopartículas (NPs) apresentam perfis de aplicação distintos, mas complementares, no combate a microrganismos e em

contextos farmacêuticos e ambientais. As CaO-NPs apresentaram potente geração de ROS e atividade antibiofilme, especialmente quando obtidas por biossíntese de *Ficus carica*, indicando potencial para aplicações farmacêuticas e ambientais. As SiO₂-NPs, por sua vez, mostraram-se seguras e versáteis, com aplicações promissoras em revestimentos de dispositivos médicos e na purificação de água, especialmente quando funcionalizadas, como no caso de SiO₂-NPs revestidas com ZnO, que apresentaram eficiência significativa na remoção de antibióticos e bactérias da água. Um achado relevante foi o efeito sinérgico entre as nanopartículas e antibióticos convencionais, em que combinações de CaO-, SiO₂- e CuO-NPs com fármacos como vancomicina e tobramicina resultaram em aumento significativo da atividade antibacteriana, favorecendo o combate a cepas resistentes e permitindo a redução das doses necessárias de antibióticos, o que pode minimizar efeitos adversos.

Essa vantagem também foi evidenciada no estudo de Abdallah et al. (2024), que analisou nove estudos pré-clínicos in vivo sobre o uso de nanomateriais encapsulados como alternativa para superar a resistência de bactérias Gram-negativas a carbapenêmicos, um dos grupos mais críticos de patógenos multirresistentes (MDR). Os resultados demonstraram que a combinação de antibióticos com nanomateriais encapsulados é uma estratégia altamente eficaz e segura, promovendo redução significativa da carga bacteriana no sangue e tecidos, aumento expressivo das taxas de sobrevivência dos modelos animais (atingindo 100% em alguns casos) e melhora dos marcadores inflamatórios e histológicos, com evidências de recuperação tecidual. A encapsulação com nanomateriais como quitosana, ácido hialurônico, nanopartículas de prata e de óxido de zinco mostrou-se um método-chave, ao permitir que antibióticos como imipenem e meropenem fossem "aprisionados" ou ligados ao nanomaterial, transformando-o em um sistema de entrega eficiente. Esse processo possibilita liberação controlada e direcionada no local da infecção, superando barreiras de resistência e potencializando a eficácia da terapia com doses menores e mais seguras.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O surgimento de bactérias resistentes a múltiplos antibióticos representa uma ameaça crescente e de alto impacto para a saúde pública global, restringindo as opções

terapêuticas e elevando as taxas de mortalidade associadas a infecções de difícil tratamento. Nesse contexto, os nanomateriais configuram-se como uma alternativa estratégica e promissora, capazes de superar limitações dos fármacos convencionais e ampliar as possibilidades na formulação de compostos antimicrobianos, incluindo produtos destinados à higienização de superfícies expostas a bactérias resistentes associadas à contaminação alimentar, bem como aplicações tópicas voltadas à prevenção de biofilmes em feridas, que representam importante risco de infecção.

Sua elevada área de superfície, a versatilidade estrutural e a capacidade de interagir com múltiplos alvos bacterianos ampliam seu potencial antimicrobiano, dificultando o desenvolvimento de resistência. Além disso, sua aplicabilidade como sistemas de liberação controlada de antibióticos abre caminho para terapias mais eficazes e seguras, com possibilidade de redução de doses e efeitos adversos. Coletivamente, esses avanços reforçam a necessidade de investimentos contínuos em pesquisa translacional e clínica, a fim de viabilizar a incorporação dos nanomateriais como ferramentas concretas que eventualmente auxiliarão no combate às bactérias MDR no futuro, auxiliando no enfrentamento da crise global da resistência antimicrobiana.

REFERÊNCIAS

ABDALLAH, Omnia M. et al. The impact and safety of encapsulated nanomaterials as a new alternative against carbapenem resistant bacteria: a systematic review. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 40, n. 2, p. 72, 2024. AL-AWSI, G. R. L. et al. Application of nano-antibiotics in the diagnosis and treatment of infectious diseases. *Brazilian Journal of Biology*, v. 84, p. e264946, 2023.

ALGADI, Hend; ALHOOT, Mohammed Abdelfatah; YAAQOUB, Laith A. Systematic review of antibacterial potential in calcium oxide and silicon oxide nanoparticles for clinical and environmental infection control. *Journal of Applied Biomedicine*, v. 23, n. 1, 2025.

ALGADI, Hend et al. Effects of metal and metal oxide nanoparticles against biofilm-forming bacteria: a systematic review. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 34, n. 9, p. 1748, 2024.

BARAN, Aleksandra; KWIATKOWSKA, Aleksandra; POTOCKI, Leszek. Antibiotics and bacterial resistance—a short story of an endless arms race. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 24, n. 6, p. 5777, 2023.

BAYDA, Samer et al. The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical—

physical applications to nanomedicine. *Molecules*, v. 25, n. 1, p. 112, 2019.

DENISSEN, Julia et al. Prevalence of ESKAPE pathogens in the environment: Antibiotic resistance status, community-acquired infection and risk to human health. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, v. 244, p. 114006, 2022.

GALVÃO, Taís Freire; TIGUMAN, Gustavo Magno Baldin; SARKIS-ONOFRE, Rafael. A declaração PRISMA 2020 em português: recomendações atualizadas para o relato de revisões sistemáticas. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, v. 31, p. e2022364, 2022.

GIRMA, Abayeneh et al. Antibacterial activity and mechanisms of action of inorganic nanoparticles against foodborne bacterial pathogens: a systematic review. *IET Nanobiotechnology*, v. 2024, n. 1, p. 5417924, 2024.

HUH, Ae Jung; KWON, Young Jik. "Nanoantibiotics": a new paradigm for treating infectious diseases using nanomaterials in the antibiotics resistant era. *Journal of controlled release*, v. 156, n. 2, p. 128-145, 2011.

HOLT-TORRES, Patricia S.; CHEN, Yiqing; LIU, Huinan Hannah. Evaluation of antimicrobial activities of nanoparticles and nanostructured surfaces in vitro. *Journal of visualized experiments: JoVE*, n. 194, p. 10.3791/64712, 2023.

MENDOZA AVILÉS, Aimee Marlene et al. Biocompatibilidad y actividad microbiana de sulfuro de plata nanoestructurado para aplicación en biomateriales: revisión sistemática. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, v. 14, n. 27, 2021.

MORADI, Farhad et al. Recent advance on nanoparticles or nanomaterials with anti-multidrug resistant bacteria and anti-bacterial biofilm properties: a systematic review. *Heliyon*, v. 9, n. 11, 2023.

OLIVEIRA, Raphaella I. S. et al. Photocatalytic effect of N-TiO₂ conjugated with folic acid against biofilm-forming resistant bacteria. *Heliyon*, v. 9, n. 11, 2023.

RASHA, Elsayim et al. Effects of zinc oxide nanoparticles synthesized using *Aspergillus niger* on carbapenem-resistant *Klebsiella pneumoniae* in vitro and in vivo. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, v. 11, p. 748739, 2021.

SEN, Samya; SARKAR, Keka. Effective biocidal and wound healing cogency of biocompatible glutathione: citrate-capped copper oxide nanoparticles against multidrug-resistant pathogenic enterobacteria. *Microbial Drug Resistance*, v. 27, n. 5, p. 616-627, 2021.

SOUSA, Maura Marinete de et al. Sanitizing activity of silver nanoparticles synthesized with natural products on dairy industry surfaces. *Ciência Rural*, v. 54, n. 4, p. 20230027, 2023.

SOUZA, Marcela Tavares de; SILVA, Michelly Dias da; CARVALHO, Rachel de. Revisão integrativa: o que é e como fazer. *Einstein (São Paulo)*, v. 8, p. 102-106, 2010.

SOUZA, Pedro Borges de et al. Pesquisa e desenvolvimento de nanomedicamentos: olhar

bioético. *Revista Bioética*, v. 31, p. e3014PT, 2023.

THOMAZ, Luciana et al. In vivo activity of silver nanoparticles against *Pseudomonas aeruginosa* infection in *Galleria mellonella*. *Frontiers in Microbiology*, v. 11, p. 582107, 2020.

WANG, Linlin; HU, Chen; SHAO, Longquan. The antimicrobial activity of nanoparticles: present situation and prospects for the future. *International Journal of Nanomedicine*, p. 1227-1249, 2017.

WANG, W. et al. Photothermal-enabled single-atom catalysts for high-efficiency hydrogen peroxide photosynthesis from natural seawater. *Nature Communications*, v. 14, n. 1, 2023.

WHO. Antimicrobial resistant fact sheet. Disponível em: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs194/en/>. Acesso em: 10 set. 2025.

ZOU, Wei et al. Nanomedicine to overcome antimicrobial resistance: Challenges and prospects. *Nanomedicine*, v. 18, n. 5, p. 471-484, 2023.



CENTRO UNIVERSITÁRIO
SANTO AGOSTINHO