

REVISTA ARTE, CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Homepage: <https://ojs.unicet.edu.br/react>

ISSN: 2674-9157

Artigo de Revisão

PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DAS BACTÉRIAS PRODUTORAS DE ENZIMAS COM APLICAÇÕES TERAPÊUTICAS E COSMÉTICAS: UMA REVISÃO INTEGRADA DA LITERATURA

MAIN CONTRIBUTIONS OF ENZYME-PRODUCING BACTERIA WITH THERAPEUTIC AND COSMETIC APPLICATIONS: AN INTEGRATIVE LITERATURE REVIEW

CLEVERLANDIA RODRIGUES SILVA¹, MARIA DELMA DOS SANTOS RESENDE², MARIA DA GRAÇAS PRIANTI³, DANIELLE ZILDEANA SOUSA FURTADO⁴

RESUMO

As bactérias, tradicionalmente associadas a processos patológicos, também apresentam elevado potencial biotecnológico, especialmente na produção de enzimas com aplicações terapêuticas e cosméticas. Os avanços da biotecnologia e da engenharia genética possibilitaram a utilização segura e eficiente desses microrganismos como fontes sustentáveis de compostos bioativos. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar as principais contribuições das bactérias produtoras de enzimas para uso terapêutico e cosmético, por meio de uma revisão integrativa da literatura. As buscas foram realizadas nas bases de dados SciELO, Google Acadêmico e PubMed, utilizando descritores relacionados a bactérias, microrganismos, cosmética e medicamentos, contemplando publicações entre 2018 e 2023. Após aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, foram selecionados seis estudos para análise. Os resultados evidenciam que as bactérias são capazes de produzir enzimas de alta qualidade, como proteases, amilases, lipases, nucleases e catalases, amplamente empregadas em tratamentos terapêuticos e na formulação de produtos cosméticos. Destaca-se ainda o uso da celulose bacteriana associada a compostos naturais, como o extrato de própolis, e a aplicação do plasma não térmico para otimização de propriedades cosméticas. Conclui-se que as bactérias representam uma alternativa eficiente, sustentável e economicamente viável para a produção de enzimas, contribuindo significativamente para o desenvolvimento de produtos terapêuticos e cosméticos inovadores, desde que observados rigorosos critérios de segurança e controle de qualidade.

Palavras-chave: Bactérias. Enzimas. Terapêutica. Cosméticos. Biotecnologia

ABSTRACT

Bacteria, traditionally associated with pathological processes, also present significant biotechnological potential, particularly in the production of enzymes with therapeutic and cosmetic applications. Advances in biotechnology and genetic engineering have enabled the safe and efficient use of these microorganisms as sustainable sources of bioactive compounds. In this context, the present study aimed to analyze the main contributions of enzyme-producing bacteria for therapeutic and cosmetic use through an integrative literature review. Searches were conducted in the SciELO, Google Scholar, and PubMed databases using descriptors related to bacteria, microorganisms, cosmetics, and medicines, including publications from 2018 to 2023. After applying inclusion and exclusion criteria, six studies were selected for analysis. The results demonstrate that bacteria are capable of producing high-quality enzymes, such as proteases, amylases, lipases, nucleases, and catalases, which are widely used in therapeutic treatments and cosmetic formulations. The use of bacterial cellulose combined with natural compounds, such as propolis extract, and the application of non-thermal plasma to improve cosmetic properties were also highlighted. It is concluded that bacteria represent an efficient, sustainable, and cost-effective alternative for enzyme production, significantly contributing to the development of innovative therapeutic and cosmetic products, provided that strict safety and quality control measures are applied.

Keywords: Bacteria. Enzymes. Therapeutics. Cosmetics. Biotechnology.

1 Acadêmico(a) do Curso de Bacharelado em Biomedicina, Centro Universitário de Tecnologia de Teresina - UNI CET, Teresina, Piauí, Brasil. Número do ORCID: 0009-0008-9219-3458, email: cleverlandiarodrigues@gmail.com, <http://lattes.cnpq.br/0949000631410575>

2 Acadêmico(a) do Curso de Bacharelado em Biomedicina, Centro Universitário de Tecnologia de Teresina - UNI CET, Teresina, Piauí, Brasil. Número do ORCID 0009-0001-6059-7270, email: delmaesteticaesp@gmail.com

3 Doutora em Fisiopatologia Experimental, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. Docente do Curso de Bacharelado em Biomedicina, Centro Universitário de Tecnologia de Teresina - UNI CET, Teresina, Piauí, Brasil. Número do ORCID: 0009-0008-7983-4011, mgprianiti@gmail.com, <http://lattes.cnpq.br/5410431918965521>

4 Doutora em Ciências da Saúde, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil. Docente do Curso de Bacharelado em Biomedicina, Centro Universitário de Tecnologia de Teresina - UNI CET, Teresina, Piauí, Brasil. Número do ORCID: 0000-0001-5653-494X, daniellefurtado@gmail.com, <http://lattes.cnpq.br/3063045899234754>. *Autor correspondente: Danielle Zildeana Sousa Furtado, daniellefurtado@gmail.com, 86 98897-3582. Número total e palavras: 20243

INTRODUÇÃO

As enzimas são proteínas que atuam como catalizadores biológicos, acelerando as reações químicas necessárias para a manutenção da vida (ROBINSON, 2015). As bactérias produtoras de enzimas representam uma fonte de produtos com demandas nas áreas terapêuticas e de cosméticos. Por exemplo, as proteases, lipases, amilases, colagenases, hialuronidases e antioxidantes bacterianos têm sido utilizadas na produção de fármacos, de agentes cicatrizantes, anti-inflamatórios, diagnóstico de patologias e para a indústria de cosméticos (GURUNG *et al.*, 2013). A versatilidade dessas enzimas as torna ferramentas valiosas para diversas aplicações.

Na biotecnologia, as enzimas oriundas a partir de microrganismos, tem se destacado por apresentar diversidade funcional, baixo custo para produção, estabilidade em diferentes condições físico-químicas, otimização, reprodutibilidade e produção em larga escala por métodos fermentativos em ambientes controlados (FASIM *et al.*, 2021), além de ser biodegradado o que favorece a sustentabilidade (LANGONE; DE FIGUEIREDO; LANGONE, 2025).

No contexto médico, os microrganismos, como *Escherichia coli* e *Saccharomyces cerevisiae*, são utilizados para a produção de medicamentos. Através da manipulação genética, é possível modificar esses microrganismos para que produzam substâncias terapêuticas, como a insulina (um hormônio utilizado no tratamento da diabetes) (BAESHEN *et al.*, 2014) e a enzima como a lactase, que auxilia na digestão da lactose em pacientes com intolerância (RUBIO-TEXEIRA *et al.*, 2000).

No setor de cosméticos, os microrganismos como a bactéria probiótica *Lactobacillus plantarum*, tem demonstrado atividade no melhoramento da pele, promovendo sua hidratação e proteção contra agentes externos (LEE *et al.*, 2015). Além disso, esses microrganismos aumentam substâncias antioxidantes, como a superóxido dismutase, que tem atividade no combate de radicais livres e antimicrobianas, como as bacteriocinas (TODOROV, 2009), que são utilizadas na composição de produtos de skincare para prevenir infecções cutâneas (ZARE *et al.*, 2024).

As enzimas são proteínas que atuam como catalizadores biológicos, acelerando as reações químicas necessárias para a manutenção da vida (Robson, 2015) [10.1042/bse0590001](https://doi.org/10.1042/bse0590001).

No setor da biotecnologia, as enzimas oriundas a partir de microrganismos, principalmente as de origem bacteriana, tem se destacado por apresentar diversidade funcional, estabilidade em diferentes condições físico-químicas e produção em larga escala por métodos fermentativos em ambientes controlados e ser biodegradável o que favorece o meio ambiente.

No contexto biotecnológico, as enzimas de origem microbiana, especialmente aquelas produzidas por bactérias, têm se destacado devido à sua diversidade funcional, estabilidade em diferentes condições físico-químicas e possibilidade de produção em larga escala por meio de processos fermentativos controlados (**Inserir referência clássica sobre enzimas e catálise biológica – ex.: Autor, ano**).

MATERIAL E MÉTODOS

A seção de métodos deve descrever com clareza e detalhamento o desenho experimental, incluindo a quantidade e qualidade dos experimentos realizados, bem como os procedimentos adotados, de forma que outros pesquisadores possam reproduzir os resultados ou dar continuidade ao estudo. Para pesquisas do tipo revisão (sistemática, narrativa, integrativa, entre outras), deve-se explicitar os critérios de seleção, fontes de dados, estratégias de busca e métodos de análise utilizados.

Quando a pesquisa envolver experimentos com seres humanos ou animais, é obrigatório indicar o cumprimento das normas do Comitê de Ética em Pesquisa da instituição responsável, incluindo a menção explícita ao número do CAEE (Certificado de Apresentação para Apreciação Ética). Além disso, os procedimentos devem estar em conformidade com as diretrizes da Declaração de Helsinque para pesquisas com humanos e as normas de Ética em Experimentação Animal.

Todas as drogas, substâncias químicas ou reagentes utilizados devem ser descritos detalhadamente, incluindo nomes genéricos, dosagens, vias e formas de administração. Deve-se garantir a confidencialidade dos participantes, evitando a divulgação de nomes, iniciais ou números de registros hospitalares.

Por fim, ao utilizar métodos estatísticos, os autores devem citar as técnicas empregadas, com referências bibliográficas apropriadas, para assegurar a transparência e a validade dos resultados apresentados.

INTRODUÇÃO

Essas enzimas têm sido utilizadas também no tratamento de doenças inflamatórias (NARAYANAN, 2025), infecciosas (QIN *et al.*, 2023), metabólicas (DAMASCENO *et al.*, 2020) e dermatológicas (RIVERA, 2020), além de serem empregadas em sistemas de liberação controlada de fármacos (MINAL; AKANKSHA; NILESH, 2025).

Paralelamente, a indústria cosmética tem incorporado enzimas como alternativas mais sustentáveis e eficazes aos compostos químicos tradicionais, atendendo à crescente demanda por produtos biotecnológicos, naturais e com menor impacto ambiental (HONG *et al.*, 2025).

Esses estudos reforçam o crescente reconhecimento do papel fundamental dos microrganismos produtores de enzimas nas mais diversas áreas, particularmente nas cosméticas e terapêuticas. Esta revisão tem como objetivo sintetizar o conhecimento atual sobre a aplicação dos microrganismos produtores de enzimas para o uso terapêutico e cosmético, destacando os tipos de enzimas mais utilizadas, benefícios e suas aplicações. Acredita-se que os resultados desta revisão contribuam para a consolidação do conhecimento na área e subsidiem futuras pesquisas e aplicações biotecnológicas.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracteriza-se como uma pesquisa de revisão do tipo integrativa da literatura, com abordagem qualitativa e exploratória. Conforme pontua De Sousa *et al.* (2017), a revisão integrativa da literatura é um trabalho que influi diretamente na construção do conhecimento, o qual se caracteriza por ser um levantamento teórico acerca de um determinado questionamento científico que enseja a pesquisa a ser produzida, uma vez que alinha o conhecimento adquirido àquele que está em processo de construção. Esta revisão foi conduzida a partir da seguinte questão norteadora: quais são as principais contribuições das bactérias produtoras de enzimas para aplicações terapêuticas e cosméticas na literatura científica?

A pesquisa baseou-se nas diretrizes do protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), adaptadas ao escopo de uma revisão integrativa (MOHER *et al.*, 2009). Para isso, foram analisadas as bases de dados científicas SciELO, Google Acadêmico e PubMed.

Os descritores utilizados foram gerados a partir da lista de descritores em Ciências da Saúde (DeCS), sendo eles: Bactérias, Microorganismos, Cosmética e Medicamentos. Foram utilizados os operadores booleanos AND e OR para a busca, por meio das combinações: *Bactérias AND Cosmética AND Microorganismos OR Bactérias*.

Como critérios de inclusão, foram adotados: artigos originais completos disponíveis online; publicações entre os anos de 2018 e 2023, com exceção de literaturas clássicas ou considerações indispensáveis; pesquisas nos idiomas português, inglês e espanhol; e estudos que abordassem diretamente a utilização de enzimas bacterianas com fins terapêuticos ou cosméticos. Como critérios de exclusão, foram desconsiderados: artigos duplicados, artigos não originais, estudos com metodologia inadequada ou sem rigor científico, publicações não revisadas por pares e estudos fora do escopo da pesquisa.

Os artigos foram selecionados em três etapas:

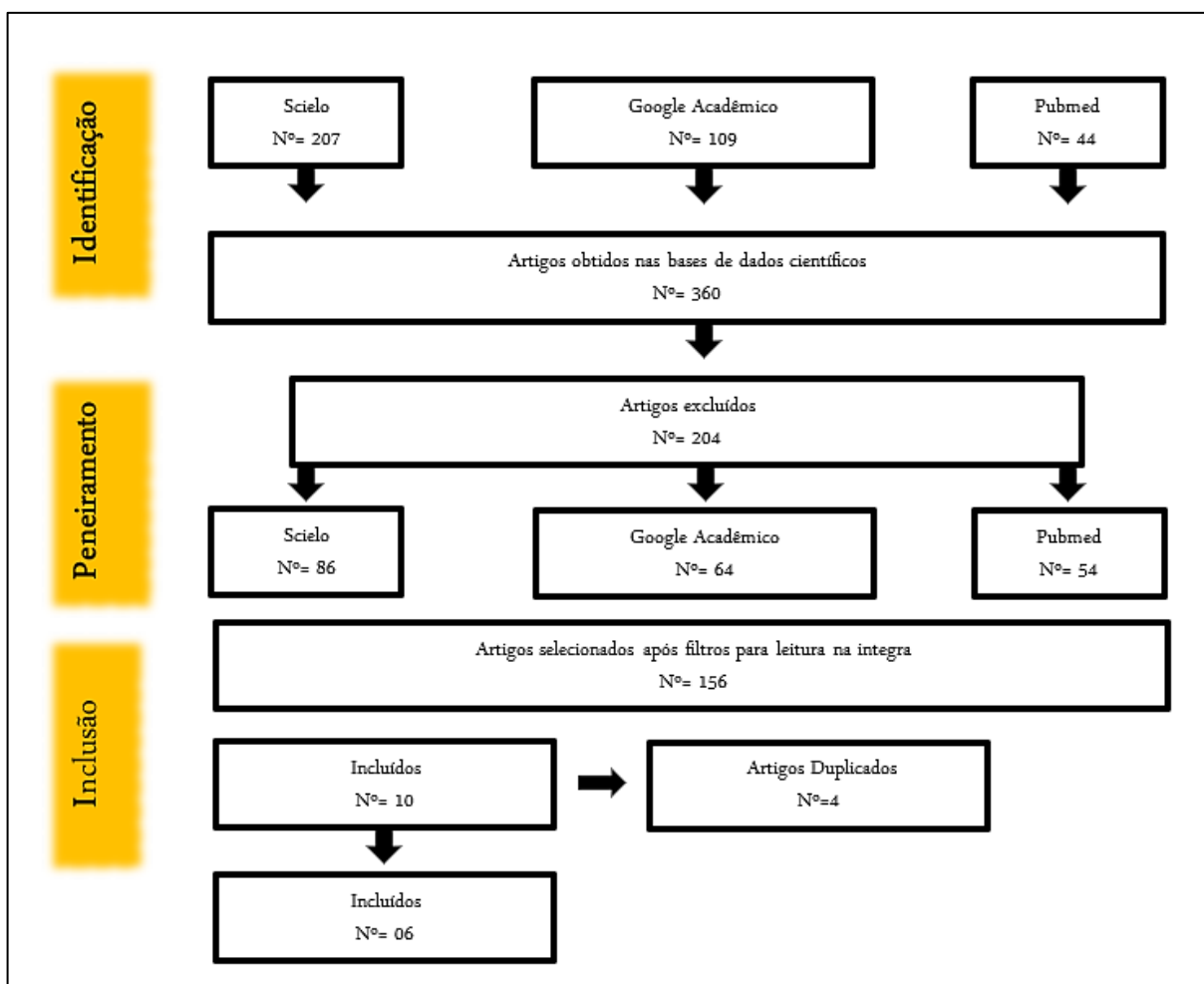
- (i) Leitura dos títulos e resumos para triagem inicial;
- (ii) Leitura dos textos completos dos estudos potencialmente elegíveis;
- (iii) Análise final para inclusão na síntese.

Os dados extraídos dos artigos selecionados foram organizados em uma tabela contendo: autor, ano, objetivo, tipo de enzima estudada, aplicação (cosmética ou terapêutica) e principais achados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das buscas, foram identificados 360 artigos, sendo 207 na SciELO, 109 no Google Acadêmico e 44 no PubMed. Na segunda etapa, foi realizada a leitura dos títulos e resumos e aplicados os critérios de inclusão e exclusão, sendo assim excluídos 204 artigos. Após a triagem inicial, foram incluídos 156 artigos para a leitura na íntegra. Nessa etapa, foram excluídos estudos com dados inconsistentes e incompletos e também aqueles que abordavam o tema de forma muito superficial.

Dessa forma, foram incluídos sete artigos científicos para compor a amostra final. (Fluxograma 1).



Fluxograma 1. Fases de seleção dos artigos baseado do método PRISMA adaptado.
 Fonte: Autoria própria

FINANCIAMENTO

Relatar as fontes de financiamento. Informar a ausência de financiamento.

Após a aplicação dos critérios, sete artigos foram incluídos. Esses estudos foram analisados quanto ao ano de publicação, objetivo, tipo de enzima estudada, aplicação (cosmética ou terapêutica) e aos principais achados. Os resultados foram organizados de forma a permitir uma análise crítica sobre as contribuições das enzimas bacterianas em contextos terapêuticos e cosméticos, conforme o Quadro 1

Quadro 1 – Caracterização dos artigos científicos incluídos na revisão.

Autor	Ano	Objetivo	Principais Achados	Tipo de enzimas/ Aplicação
Nascimento	2022	Investigar a aplicação da celulose bacteriana adicionada com extrato de própolis na indústria cosmética.	Celulose bacteriana com extrato de própolis proporciona antioxidante, hidratante e ação anti-inflamatória.	Enzimas antioxidantes/ Cosmético
Bianchet	2021	Explorar o uso de plasma não térmico para modificação de superfícies, inclusive na área cosmética.	Melhora hidrofiliabilidade, adesão de princípios ativos e resistência antimicrobiana em membranas cosméticas.	Enzimas estruturais / Cosmético
Rodrigues	2020	Estudar o papel das bactérias na produção de enzimas para produtos cosméticos.	Bactérias produzem enzimas de alta qualidade e eficácia em larga escala para cosméticos.	Proteases e lipases / Cosmético
Sedhig <i>et al.</i>	2019	Examinar a produção de enzimas terapêuticas por bactérias.	Bactérias produzem enzimas importantes para metabolismo e processos vitais, facilitando a produção em larga escala.	Enzimas digestivas / Terapêutico
Cobos-Puc <i>et al.</i>	2020	Discutir o uso de bactérias como hospedeiros para produção de enzimas terapêuticas.	Produção de enzimas em alta qualidade e quantidade por meio de manipulação genética das bactérias.	<i>Penicillin acylase</i> / Terapêutico
Kieliszek <i>et al.</i>	2021	Analisar a produção e utilização de enzimas terapêuticas em bactérias.	Produção de enzimas puras com características específicas, como proteases, amilases, nucleases, lipases e catalases.	Amilases, catalases / Terapêutico
Nascimento	2022	Avaliar a segurança e controle na produção de enzimas terapêuticas em bactérias.	Necessidade de rigorosos processos de purificação e controle de qualidade para assegurar eficácia e segurança.	Terapêutico

Fonte: Autoria própria

As evidências encontradas destacam o uso crescente de enzimas bacterianas em aplicações terapêuticas e cosméticas, refletindo uma tendência internacional de valorização da biotecnologia microbiana. As enzimas antioxidantes, proteolíticas e estruturais demonstraram eficácia em formulações cosméticas, promovendo benefícios como hidratação, combate ao envelhecimento cutâneo e proteção contra agentes infecciosos. No contexto terapêutico, enzimas digestivas e metabólicas, como amilases, catalases e *penicillin acylase*, têm sido utilizadas em terapias enzimáticas, mostrando potencial eficácia clínica quando produzidas por bactérias geneticamente modificadas.

O estudo de Nascimento (2022) revelou que a celulose bacteriana adicionada de extrato de própolis tem se mostrado uma opção promissora para aplicação na indústria cosmética. Dessa forma, a combinação da celulose bacteriana com o extrato de própolis oferece uma alternativa inovadora no desenvolvimento de cosméticos naturais e sustentáveis. Essa associação possibilita explorar as propriedades benéficas de ambos os materiais, resultando em produtos de elevada qualidade, com ação antioxidante, hidratante e anti-inflamatória, ideais para a saúde e a beleza da pele. O extrato de própolis, por sua vez, é um composto natural produzido pelas abelhas a partir de resinas vegetais e possui diversas propriedades terapêuticas e antioxidantes.

A pesquisa de Bianchet (2021) demonstrou que o plasma não térmico se apresenta como uma técnica promissora para a modificação de superfícies com diversas aplicações, inclusive na área cosmética. Essa técnica melhora propriedades das membranas, como hidrofiliabilidade, adesão de princípios ativos e resistência antimicrobiana, tornando-as mais adequadas para uso em produtos cosméticos. Outra aplicação relevante do plasma não térmico em membranas de celulose bacteriana é o aumento da resistência antimicrobiana, o que pode trazer benefícios significativos para a finalidade cosmética desses materiais.

Conforme o estudo de Rodrigues (2020), as bactérias desempenham um papel fundamental na produção de enzimas cosméticas. Entre suas principais contribuições destacam-se a capacidade de produção em larga escala, a versatilidade metabólica, a possibilidade de engenharia genética e a otimização dos processos produtivos. Esses fatores contribuem significativamente para a obtenção de enzimas de alta qualidade e eficácia, essenciais para a formulação e o desenvolvimento de produtos cosméticos.

No que tange à contribuição das bactérias na produção de enzimas para uso terapêutico, Sedighi *et al.*, (2019) ressaltam seu papel essencial nesse processo. As enzimas são proteínas especializadas que catalisam reações químicas fundamentais no organismo, atuando no metabolismo, na digestão e em diversos processos vitais. Para sua utilização terapêutica, é necessária a produção em larga escala, o que pode representar um desafio técnico.

Nesse contexto, as bactérias configuram-se como excelentes hospedeiros para a produção de enzimas, uma vez que possuem metabolismo relativamente simples e

podem ser cultivadas em grandes quantidades em meios de cultura adequados. Além disso, técnicas de engenharia genética possibilitam a modificação das bactérias para a produção de enzimas específicas em alta quantidade e qualidade (Cobos-Puc *et al.*, 2020).

A produção de enzimas terapêuticas em bactérias não apenas facilita sua obtenção, como também permite maior controle sobre o processo produtivo, possibilitando a obtenção de enzimas mais puras e com características específicas desejadas para o uso terapêutico. Ademais, as bactérias podem ser geneticamente manipuladas para produzir enzimas com propriedades aprimoradas, como maior estabilidade ou atividade enzimática (Kieliszek *et al.*, 2021).

Entretanto, é importante ressaltar que a produção de enzimas terapêuticas em bactérias exige cuidados relacionados à segurança e à pureza do produto final.

É necessário assegurar que as cepas bacterianas utilizadas sejam seguras e que não haja contaminação por toxinas ou componentes indesejados. Para isso, são indispensáveis processos rigorosos de purificação e controle de qualidade, garantindo a eficácia e a segurança das enzimas produzidas (Nascimento, 2022).

Cabe destacar que as bactérias são capazes de produzir diversas enzimas com propriedades terapêuticas, tais como: proteases, que atuam na degradação de proteínas e podem ser utilizadas no tratamento de feridas, auxiliando na remoção de tecidos necróticos e na cicatrização; amilases, responsáveis pela degradação do amido em açúcares simples, empregadas em terapias de reposição enzimática para distúrbios metabólicos hereditários, como a doença de Pompe; nucleases, que promovem a degradação de ácidos nucleicos (DNA e RNA), com aplicações no tratamento de doenças virais e na terapia gênica; lipases, responsáveis pela quebra de gorduras, utilizadas no tratamento de doenças relacionadas à digestão lipídica, como pancreatite crônica e fibrose cística; e catalases, que atuam como antioxidantes ao decompor o peróxido de hidrogênio em água e oxigênio, sendo empregadas em terapias voltadas a doenças associadas ao estresse oxidativo, como doenças inflamatórias e neurodegenerativas (Kieliszek *et al.*, 2021; Bianchet, 2021).

Esses exemplos representam apenas algumas das enzimas produzidas por bactérias para uso terapêutico. Existem inúmeras outras enzimas com aplicações diversas, incluindo o tratamento de doenças metabólicas, distúrbios digestivos e infecções. A biotecnologia e a engenharia genética têm contribuído de forma

significativa para o desenvolvimento de novas enzimas e para o aprimoramento das já existentes, ampliando o potencial terapêutico das bactérias.

A principal vantagem relatada nos estudos analisados foi a possibilidade de produção em larga escala, associada a baixos custos e alta reprodutibilidade, o que torna as bactérias excelentes sistemas hospedeiros para a biossíntese enzimática. Além disso, as técnicas de engenharia genética permitiram a modulação das vias biossintéticas, resultando em enzimas com maior estabilidade, especificidade e segurança terapêutica.

Apesar das aplicações promissoras, poucos estudos abordaram de forma aprofundada as questões regulatórias e os desafios relacionados à purificação e ao controle de contaminantes. Essas lacunas reforçam a necessidade de pesquisas adicionais que avaliem aspectos como toxicologia, imunogenicidade e escalabilidade industrial dos produtos finais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo permitiu identificar e analisar criticamente o papel das bactérias produtoras de enzimas com aplicações nos setores terapêutico e cosmético. Os estudos revisados demonstram que as enzimas bacterianas apresentam ampla aplicabilidade, elevada eficiência catalítica e potencial para produção em larga escala, especialmente quando associadas a estratégias de engenharia genética. Observou-se que, embora os resultados laboratoriais e experimentais sejam promissores, ainda são necessárias investigações que avaliem a segurança toxicológica, os desafios regulatórios, a viabilidade econômica e a sustentabilidade ambiental da produção e aplicação dessas enzimas em produtos comercializáveis. A ausência de padronização metodológica entre os estudos limita comparações mais robustas e evidencia a necessidade de maior uniformidade nas futuras pesquisas. Portanto, conclui-se que as bactérias representam uma alternativa sustentável e estratégica para a inovação em biotecnologia enzimática, com potencial positivo para as indústrias da saúde e cosmética. Entretanto, recomenda-se que mais pesquisas multidisciplinares sejam realizadas, visando à possível utilização desses produtos biológicos na prática clínica e no mercado cosmético.

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram que não possuem conflitos de interesse de natureza financeira, comercial, pessoal ou política relacionados ao tema ou ao desenvolvimento do presente artigo.

FINANCIAMENTO

O presente estudo não recebeu financiamento específico de agências de fomento do setor público, comercial ou sem fins lucrativos. Os autores agradecem todo o apoio institucional e acadêmico recebido para a realização desta pesquisa.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES:

Concepção e desenho da pesquisa: FURTADO D., PRIANTI M., SILVA, C., RESENDE., D. Obtenção de dados: SILVA, C., RESENDE., D. Análise e interpretação dos dados: SILVA, C., RESENDE., D. Redação do manuscrito: SILVA, C., RESENDE., D. Revisão crítica do manuscrito quanto ao conteúdo intelectual importante: FURTADO D., PRIANTI M.

REFERÊNCIAS

BAESHEN, N. A.; BAESHEN, M. N.; SHEIKH, A.; BORA, R. S.; AHMED, M. M. M.; RAMADAN, H. A. I.; SAINI, K. S.; REDWAN, E. M. *Cell factories for insulin production*. **Microbial Cell Factories**, Londres, v. 13, n. 1, p. 141, dez. 2014. DOI: 10.1186/s12934-014-0141-0.

BIANCHET, Ritanara Tayane. *Aplicabilidade do plasma não térmico em membranas de celulose bacteriana para finalidade cosmética*. 2021.

COBOS-PUC, Luis et al. *Classical and new pharmaceutical uses of bacterial penicillin G acylase*. **Current Pharmaceutical Biotechnology**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 287–297, 2020. DOI: 10.2174/1389201021666200212102631.

DAMASCENO, L. E. A.; PRADO, D. S.; VERAS, F. P.; FONSECA, M. M.; TOLLER-KAWAHISA, J. E.; ROSA, M. H.; PÚBLIO, G. A.; MARTINS, T. V.; RAMALHO, F. S.; WAISMAN, A.; CUNHA, F. Q.; CUNHA, T. M.; ALVES-FILHO, J. C. *PKM2 promotes Th17 cell differentiation and autoimmune inflammation by fine-tuning STAT3*

activation. **Journal of Experimental Medicine**, Nova Iorque, v. 217, n. 10, p. e20190613, out. 2020. DOI: 10.1084/jem.20190613.

FASIM, A.; MORE, V. S.; MORE, S. S. *Large-scale production of enzymes for biotechnology uses*. **Current Opinion in Biotechnology**, Amsterdã, v. 69, p. 68–76, jun. 2021. DOI: 10.1016/j.copbio.2020.12.003.

GURUNG, N.; RAY, S.; BOSE, S.; RAI, V. *A broader view: microbial enzymes and their relevance in industries, medicine, and beyond*. **BioMed Research International**, Londres, v. 2013, art. 329121, 2013. DOI: 10.1155/2013/329121.

HONG, J. Y.; KWON, D.; PARK, K. Y. *Microbiome-based interventions for skin aging and barrier function: a comprehensive review*. **Annals of Dermatology**, Seul, v. 37, n. 5, p. 259–272, 2025. DOI: 10.5021/ad.2025.37.5.259.

LANGONE, J.; FIGUEIREDO, M. A. G. de; LANGONE, M. A. P. *Biocatálise e mercado de enzimas: tendências, avanços tecnológicos e impactos na bioeconomia*. **Química Nova**, São Paulo, 2025. Disponível em: https://quimicanova.sbq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=9989&nomeArquivo=AG2025-0172.pdf. Acesso em: 30 dez. 2025.

LEE, D. E.; HUH, C.-S.; RA, J.; CHOI, I.-D.; JEONG, J.-W.; KIM, S.-H.; RYU, J. H.; SEO, Y. K.; KOH, J. S.; LEE, J.-H.; SIM, J.-H.; AHN, Y.-T. *Clinical evidence of effects of Lactobacillus plantarum HY7714 on skin aging: a randomized, double-blind, placebo-controlled study*. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, Seul, v. 25, n. 12, p. 2160–2168, dez. 2015. DOI: 10.4014/jmb.1507.07076.

MINAL, N.; AKANKSHA, K.; NILESH, W. *Biochemical precision: enzyme-responsive drug delivery systems in cancer therapy*. **Current Enzyme Inhibition**, Sharjah, v. 21, 2025. Disponível em: <https://www.eurekaselect.com/244619/article>. Acesso em: 30 dez. 2025.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G.; PRISMA GROUP. *Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement*. **PLoS Medicine**, São Francisco, v. 6, n. 7, p. e1000097, jul. 2009. DOI: 10.1371/journal.pmed.1000097.

NARAYANAN, K. B. *Enzyme-based anti-inflammatory therapeutics for inflammatory diseases*. **Pharmaceutics**, Basileia, v. 17, n. 5, p. 606, maio 2025. DOI: 10.3390/pharmaceutics17050606.

NASCIMENTO, Helenise Almeida do. *Produção de biopolímero de celulose bacteriana aditivado com antioxidante natural*. 2022. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Instituição não informada, [s. l.], 2022.

QIN, C.; XIE, T.; YEH, W. W.; SAVAS, A. C.; FENG, P. *Metabolic enzymes in viral infection and host innate immunity*. **Viruses**, Basileia, v. 16, n. 1, p. 35, dez. 2023. DOI: 10.3390/v16010035.

RIVERA P., Z. M. *Uso de enzimas como tratamento dermatológico regenerador de las líneas de expresión*. **Revista Vive**, La Paz, v. 3, n. 8, p. 77–84, maio 2020.
ROBINSON, P. K. *Enzymes: principles and biotechnological applications*. **Essays in Biochemistry**, Londres, v. 59, p. 1–41, nov. 2015. DOI: 10.1042/BSE0590001.

RODRIGUES, Andreia Filipa Seabra. *Bactérias resistentes aos antibióticos em produtos cosméticos: um estudo exploratório*. 2020.

RUBIO-TEXEIRA, M.; ARÉVALO-RODRÍGUEZ, M.; LEQUERICA, J. L.; POLAINA, J. *Lactose utilization by Saccharomyces cerevisiae strains expressing Kluyveromyces lactis LAC genes*. **Journal of Biotechnology**, Amsterdã, v. 84, n. 2, p. 97–106, nov. 2000. DOI: 10.1016/S0168-1656(00)00338-1.

TODOROV, S. D. *Bacteriocins from Lactobacillus plantarum: production, genetic organization and mode of action*. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 40, n. 2, p. 209–221, jun. 2009. DOI: 10.1590/S1517-83822009000200001.

ZARE, D.; ARYAEE, H.; MIRDAMADI, S.; SHIRKHAN, F. *The benefits and applications of Lactobacillus plantarum in food and health: a narrative review*. **Iranian Journal of Public Health**, Teerã, 2024. Disponível em: <https://publish.kne-publishing.com/index.php/ijph/article/view/16698>. Acesso em: 30 dez. 2025.

KIELISZEK, Marek et al. *Characteristics of the proteolytic enzymes produced by lactic acid bacteria*. **Molecules**, Basileia, v. 26, n. 7, p. 1858, 2021. DOI: 10.3390/molecules26071858.

SEDIGHI, Mansour et al. *Therapeutic bacteria to combat cancer: current advances, challenges, and opportunities*. **Cancer Medicine**, Hoboken, v. 8, n. 6, p. 3167–3181, 2019. DOI: 10.1002/cam4.2138.