



ISSN: 2595-1661

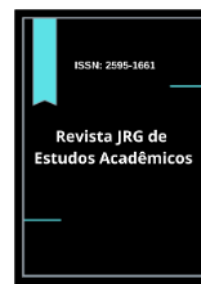
ARTIGO

Listas de conteúdos disponíveis em [Portal de Periódicos CAPES](https://portaldeperiodicos.capes.gov.br/)

## Revista JRG de Estudos Acadêmicos

Página da revista:

<https://revistajrg.com/index.php/jrg>



### Biotecnologia de microrganismos: fundamentos, bioprocessos e aplicações na indústria e na agricultura

Microbial biotechnology: fundamentals, bioprocesses, and applications in industry and agriculture

DOI: 10.55892/jrg.v9i20.2841

ARK: 57118/JRG.v9i20.2841

Recebido: 15/01/2026 | Aceito: 25/01/2026 | Publicado on-line: 27/01/2026

Charlys Seixas Maia Dornelas <sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0002-3580-9593>

<http://lattes.cnpq.br/0148614417148409>

Universidade Federal da Paraíba, PB, Brasil

E-mail: csmdornelas@hotmail.com



#### Resumo

A biotecnologia de microrganismos consolidou-se como pilar central da bioeconomia, convertendo células em “fábricas vivas” para a produção sustentável de compostos de alto valor. Esta revisão narrativa analisou evidências recentes sobre os fundamentos biológicos, engenharia de bioprocessos e aplicações industriais e agrícolas. A análise demonstra que a eficiência produtiva depende da integração entre a seleção criteriosa de chassis microbianos (bactérias, fungos e microalgas) e a otimização rigorosa do cultivo em biorreatores, abrangendo desde o controle físico-químico até estratégias de purificação (*downstream*). Destaca-se a expansão do portfólio de bioprodutos, incluindo enzimas, biopolímeros e bioinsumos, impulsionada por tecnologias emergentes como CRISPR, biologia sintética e ferramentas ômicas. Conclui-se que a convergência entre engenharia genética e monitoramento de processos (PAT) é decisiva para superar gargalos de escala e garantir a competitividade econômica, reafirmando o papel dos microrganismos na transição para sistemas produtivos globais mais limpos e eficientes

**Palavras-chave:** Bioprocessos; Bioeconomia; Bioinsumos; Engenharia metabólica.

#### Abstract

*Microbial biotechnology has established itself as a central pillar of the bioeconomy, converting cells into "living factories" for the sustainable production of high-value compounds. This narrative review analyzed recent evidence (2020–2026) regarding biological fundamentals, bioprocess engineering, and industrial and agricultural applications. The analysis demonstrates that productive efficiency depends on the integration between the careful selection of microbial chassis (bacteria, fungi, and microalgae) and the rigorous optimization of cultivation in bioreactors, ranging from*

<sup>1</sup> Graduado em Medicina Veterinária. Mestre em Zootecnia, Doutor em Agronomia.



*physicochemical control to purification strategies (downstream processing). The expansion of the bioproduct portfolio, including enzymes, biopolymers, and bioinputs, is highlighted, driven by emerging technologies such as CRISPR, synthetic biology, and omics tools. It is concluded that the convergence of genetic engineering and process monitoring (PAT) is decisive for overcoming scale-up bottlenecks and ensuring economic competitiveness, reaffirming the role of microorganisms in the transition towards cleaner and more efficient global production systems*

**Keywords:** *Bioprocesses; Bioeconomy; Bioinputs; Metabolic engineering.*

## 1. Introdução

Na última década, a biotecnologia de microrganismos consolidou-se como um dos pilares centrais da bioeconomia, fundamentalmente por transformar bactérias, leveduras e fungos em plataformas produtivas capazes de converter matérias-primas renováveis em moléculas de alto valor agregado. Esse avanço reflete a crescente valorização de rotas biológicas como alternativas energeticamente mais eficientes e de menor impacto ambiental frente às cadeias petroquímicas convencionais, sobretudo quando associadas à produção sustentável em escala industrial. Nesse contexto, o conceito de fábricas microbianas tornou-se central ao integrar seleção racional de chassis, otimização metabólica e engenharia de vias biossintéticas, estabelecendo bases para uma biomanufatura economicamente viável e tecnicamente robusta (Yan et al., 2024; Cho et al., 2022). Contudo, a literatura recente enfatiza que o sucesso industrial dessas plataformas não depende apenas de produtividade, mas requer robustez fisiológica, tolerância a estresses e estabilidade genética sob condições reais de processo, atributos essenciais para sustentar estratégias de escalonamento e reduzir perdas por instabilidade em cultivos prolongados (Xu et al., 2024). Assim, a biotecnologia moderna configura-se como um campo integrador no qual microbiologia, bioquímica e biologia de sistemas convergem para atender a demandas simultâneas de inovação, competitividade e segurança.

Para materializar esse potencial biológico em produtos tangíveis, é indispensável um domínio rigoroso dos bioprocessos. A produção microbiana envolve uma cadeia articulada que abrange desde o desenvolvimento de linhagens e formulação de meios até o cultivo em biorreatores e as etapas de separação e purificação (*downstream*), responsáveis por grande parte do custo total e da qualidade final. A literatura reforça que o avanço do setor está diretamente ligado à capacidade de superar gargalos de escala e garantir padrões rigorosos de conformidade, sobretudo em produtos de alto valor agregado. Nesse sentido, a adoção de tecnologias analíticas de processo (PAT) vem se consolidando como uma tendência decisiva para elevar a reprodutibilidade e permitir monitoramento robusto durante a purificação e o controle final de qualidade (Sathiyapriyan et al., 2025). Paralelamente, análises recentes demonstram que o desenho ecoeficiente do *downstream*, com redução de consumo energético e aumento de recuperação em meios diluídos, representa um determinante direto da competitividade industrial e da sustentabilidade da biomanufatura (Janković et al., 2024; Janković et al., 2025).

Essa lógica de eficiência e sustentabilidade estende-se inevitavelmente às Ciências Agrárias, onde a biotecnologia microbiana ganhou protagonismo na transição para sistemas produtivos ambientalmente responsáveis. O uso de inoculantes e bioinsumos tornou-se estratégico para elevar a eficiência nutricional, modular estresses e reduzir a dependência de insumos químicos, mas sua adoção enfrenta obstáculos técnicos



relevantes, como variabilidade de resposta em campo, estabilidade de formulações e necessidade de validação agrônômica sob diferentes condições edafoclimáticas (Díaz-Rodríguez et al., 2025; Fadiji et al., 2024). No cenário brasileiro, onde há grande potencial de expansão tecnológica, o crescimento do setor é evidente, embora ainda existam entraves regulatórios e desigualdades regionais na distribuição de unidades produtoras, o que impõe a necessidade de governança e políticas claras para consolidar o mercado (Sambuichi et al., 2024). Em resposta a esses desafios, a institucionalização recente do marco legal dos bioinsumos fortalece o setor ao estabelecer diretrizes para produção, registro, comercialização e uso, incluindo a produção para uso próprio, ampliando a segurança jurídica e a capacidade de expansão tecnológica (Brasil, 2024). Diante desse panorama, esta revisão reúne fundamentos biológicos e princípios de bioprocessos para demonstrar como microrganismos, quando corretamente desenvolvidos e validados, atuam como agentes transformadores da indústria e da agricultura contemporâneas.

## 2. Metodologia

A presente revisão de literatura foi conduzida sob uma abordagem narrativa estruturada, incorporando etapas sistemáticas de busca, triagem e síntese temática. O objetivo central foi reunir e analisar evidências recentes sobre a biotecnologia de microrganismos, com ênfase nos fundamentos biológicos, na engenharia de bioprocessos e nas aplicações industriais e agrícolas. A estratégia metodológica foi delineada para assegurar a atualidade, a rastreabilidade e a consistência na seleção do referencial teórico.

Para a identificação dos estudos, realizou-se uma busca bibliográfica abrangente em bases de dados de alto impacto e qualidade editorial, incluindo Web of Science (Clarivate), Scopus (Elsevier), PubMed/MEDLINE, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library e Taylor & Francis Online. Complementarmente, consultaram-se plataformas de forte representatividade regional, como SciELO e o Portal de Periódicos CAPES, além do uso do Google Scholar para a recuperação de literatura cinzenta relevante ou artigos não indexados nas bases principais. Para maximizar a sensibilidade da recuperação, foram empregados descritores em português e inglês, combinados por operadores booleanos (AND/OR). A sintaxe de busca utilizou termos como “microbial biotechnology”, “industrial microbiology”, “microbial cell factory”, “bioprocess”, “fermentation”, “upstream/downstream processing”, “microbial enzymes/metabolites” e variadas terminologias agrícolas como “biofertilizers”, “biocontrol agents” e “PGPM/PGPR”, abrangendo também seus correspondentes em língua portuguesa. O recorte temporal foi delimitado ao período de 2020 a 2026, priorizando estudos recentes, e aplicou-se a técnica de *snowballing* (leitura de referências cruzadas) em artigos-chave para ampliar o alcance da revisão.

Os critérios de elegibilidade priorizaram a qualidade editorial e a pertinência temática. Foram incluídos artigos completos revisados por pares (pesquisas originais e revisões), publicados no período estipulado, que abordassem um dos cinco eixos centrais: (i) fundamentos e diversidade de microrganismos biotecnológicos; (ii) otimização e escalonamento de bioprocessos; (iii) produtos microbianos industriais; (iv) bioinsumos agrícolas; e (v) tecnologias emergentes em engenharia e *downstream*. A seleção considerou, quando aplicável, a classificação Qualis CAPES (estratos A1 e A2) e a indexação em bases robustas. Foram excluídos documentos sem revisão por pares (como resumos simples, preprints e notas técnicas), textos indisponíveis na íntegra e estudos focados exclusivamente em microbiologia básica sem conexão com aplicações produtivas.



O processo de triagem ocorreu em duas etapas consecutivas: leitura exploratória de títulos e resumos para eliminação de duplicatas e trabalhos fora do escopo, seguida pela leitura integral dos textos potencialmente elegíveis. O gerenciamento das referências foi realizado via software especializado (Mendeley/Zotero) para padronização e controle. A extração de dados focou em informações críticas como o tipo de microrganismo, condições de cultivo (meio e parâmetros operacionais), estratégias de otimização, rendimento e desafios de escalonamento. Por fim, a síntese das evidências foi construída por análise temática, integrando os resultados em um texto interpretativo que conecta fundamentos científicos, inovações tecnológicas e demandas de mercado, destacando tendências e gargalos contemporâneos da bioeconomia.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Fundamentos e diversidade microbiana aplicada

A biotecnologia de microrganismos fundamenta-se na premissa de que diferentes grupos microbianos podem atuar como plataformas biológicas, ou *chassis*, capazes de converter nutrientes em biomassa, energia e, sobretudo, em moléculas de interesse industrial e agrícola, abrangendo desde enzimas e antibióticos até biopolímeros e bioinsumos. Nesse contexto, a escolha do microrganismo ultrapassa o nível de detalhe operacional e torna-se um passo fundacional que condiciona a produtividade, a robustez do processo e a viabilidade econômica. Evidências recentes, apresentadas por Yan et al. (2024) e Chaudhary et al. (2024), indicam que o desempenho de uma rota biotecnológica depende da compatibilidade intrínseca entre o *chassis* e o produto-alvo, exigindo que critérios como organização metabólica, redes regulatórias, capacidade secretora e tolerância ao estresse sejam incorporados desde o início do desenvolvimento das linhagens.

No universo bacteriano, a relevância biotecnológica decorre majoritariamente do crescimento rápido, da facilidade de manipulação genética e da ampla diversidade metabólica, permitindo desde a produção de proteínas recombinantes até a síntese de químicos complexos. Entretanto, Yan et al. (2024) e Xu et al. (2024) ressaltam que a versatilidade bacteriana não implica homogeneidade funcional, uma vez que diferentes espécies variam drasticamente em eficiência de secreção e resistência a estresses. Assim, a seleção do hospedeiro deve considerar a disponibilidade de cofatores e os limites fisiológicos impostos por estresses redox e osmóticos, fatores que afetam diretamente o desempenho fermentativo e a estabilidade da produção.

Dentro desse domínio, as actinobactérias, especialmente o gênero *Streptomyces*, destacam-se pela elevada capacidade de sintetizar metabólitos especializados com aplicações antimicrobianas, terapêuticas e agrícolas. Esse potencial está associado à abundância de *clusters* gênicos biossintéticos e ao controle regulatório complexo que responde a sinais ambientais. Conforme evidenciam Augustijn et al. (2024), a ativação racional desses *clusters* é fundamental para superar o "silenciamento" de vias metabólicas sob condições laboratoriais, permitindo ampliar a exploração do arsenal químico de interesse biotecnológico.

Paralelamente, fungos filamentosos e leveduras ocupam posição estratégica na indústria devido à alta capacidade secretora e eficiência na produção de enzimas em larga escala. Contudo, o crescimento filamentoso impõe desafios de reologia e transferência de oxigênio em biorreatores. Nesse sentido, Lu et al. (2024) e Subramanian et al. (2025) destacam na literatura que a engenharia morfológica e as abordagens de escalonamento



orientadas pela fisiologia celular são essenciais para reduzir limitações de transporte de massa e maximizar a estabilidade produtiva em processos industriais.

Expandindo o espectro para as microalgas, a diversidade metabólica sustenta um grande potencial para biorrefinarias, incluindo a produção de lipídios, pigmentos e compostos bioativos. Entretanto, Geng et al. (2025), Hamid Nour et al. (2024) e Anyaoha et al. (2024) argumentam que a viabilidade econômica depende fortemente da produtividade de biomassa e da eficiência das etapas de colheita. Por isso, esses autores apontam estratégias de integração do cultivo com o reaproveitamento de nutrientes, captura de CO<sub>2</sub> e tratamento de efluentes como caminhos indispensáveis para reduzir custos e fortalecer modelos de economia circular.

Na agricultura, a diversidade microbiana aplicada torna-se estratégica no desenvolvimento de inoculantes e bioinsumos. Díaz-Rodríguez et al. (2025) e Fadiji et al. (2024) indicam que, embora microrganismos promotores de crescimento e agentes de biocontrole possuam mecanismos eficazes, como solubilização de nutrientes e produção de fitormônios, o desempenho em campo depende da competência de colonização da rizosfera e da estabilidade das formulações. Em síntese, como reforçam Yan et al. (2024) e Xu et al. (2024), a biotecnologia moderna reconhece que “quem produz” é tão determinante quanto “o que se produz”, consolidando a diversidade microbiana como a base conceitual que define os limites e as oportunidades para a inovação industrial e agrária.

### 3.2 Bioprocessos e cultivo em biorreatores

Os bioprocessos microbianos constituem sistemas integrados em que o desempenho produtivo reflete o equilíbrio intrínseco entre a fisiologia celular e as condições de engenharia impostas ao cultivo. O crescimento em biorreatores representa a base operacional da biotecnologia, pois é neste ambiente que se definem os limites de conversão de substrato, a produtividade e a reprodutibilidade indispensáveis ao escalonamento industrial. Nessa perspectiva, Rathore (2021) e Mitra e Murthy (2022) argumentam que a eficiência do cultivo não pode ser atribuída exclusivamente à linhagem, mas resulta da interação dinâmica entre a composição do meio, as variáveis físico-químicas e as estratégias de controle, as quais precisam ser continuamente ajustadas para mitigar variações entre lotes e manter a célula em estado produtivo.

A composição do meio de cultura ocupa papel central, regulando desde a disponibilidade de nutrientes até a estabilidade do sistema sob estresses metabólicos. Em bioprocessos modernos, a otimização busca reduzir limitações de transporte de massa e controlar o acúmulo de metabólitos inibitórios. Segundo Palladino et al. (2024) e Reardon (2021), o objetivo é manter condições que favoreçam o particionamento de carbono para a síntese do produto, e não apenas para a biomassa. Além disso, esses autores destacam que sensores e estratégias de automação têm avançado para manter o cultivo em “janelas fisiológicas” mais estáveis e previsíveis, reduzindo oscilações que afetam a expressão gênica e o metabolismo.

Para assegurar a robustez industrial, o controle rigoroso de variáveis como temperatura, pH, oxigênio dissolvido e agitação, associado à manutenção da esterilidade, é determinante para a qualidade do produto e para evitar falhas críticas por contaminação. A literatura recente, incluindo o trabalho de Palladino et al. (2024), reforça que a confiabilidade produtiva depende cada vez mais da instrumentação e da digitalização conectadas ao monitoramento em tempo real, ampliando a rastreabilidade e a integridade do processo.

Quanto aos modos de operação, a escolha entre batelada (batch), batelada





alimentada (fed-batch) e contínuo define as estratégias de alimentação e os perfis de produtividade. Kopp et al. (2020) e Thiele et al. (2024) indicam que, embora a batelada seja operacionalmente simples, o regime fed-batch permanece como uma das abordagens mais utilizadas para controlar a oferta de substrato e evitar a repressão catabólica, favorecendo alta densidade celular e maiores títulos de produto. Por outro lado, Herwig (2021) e Xie et al. (2022) apontam a fermentação contínua como uma tendência para maximizar a produtividade volumétrica e a eficiência do uso de ativos industriais, ressaltando que seu sucesso depende da estabilidade genética para operar em estado estacionário sob controle rigoroso.

Acompanhando essa evolução, cresce a relevância do monitoramento em tempo real alinhado à filosofia de Process Analytical Technology (PAT). Gerzon et al. (2022) e Sathiyapriyan et al. (2025) explicam que o uso de sensores e métodos analíticos integrados permite respostas dinâmicas a mudanças do processo e maior previsibilidade operacional. Assim, a convergência entre biologia e engenharia de controle consolida-se como o eixo determinante para transformar substratos em produtos com consistência industrial, qualidade regulatória e competitividade econômica.

### 3.3 Produtos e Aplicações Biotecnológicas

A materialização da biotecnologia microbiana concretiza-se quando células são convertidas em sistemas produtivos escaláveis, aptos a transformar substratos simples, incluindo resíduos agroindustriais, em moléculas de alto valor econômico. Segundo Cho et al. (2022) e Yan et al. (2024), esse avanço é impulsionado fundamentalmente pela consolidação do conceito de “fábricas microbianas”, onde a engenharia metabólica e a biologia sintética permitem direcionar os fluxos de carbono e ampliar a produtividade, viabilizando novas rotas de biomanufatura em larga escala.

Dentro desse portfólio, as enzimas industriais permanecem como um eixo tecnológico clássico, substituindo catalisadores químicos em setores como alimentos e fármacos com ganhos de especificidade e sustentabilidade. Chandra et al. (2020) destacam a relevância das lipases e outras hidrolases microbianas, cuja estabilidade e facilidade de produção sustentam aplicações que variam desde o processamento de ingredientes até a síntese de moléculas de interesse industrial.

No grupo dos metabólitos de plataforma, os ácidos orgânicos e as vitaminas representam blocos construtores estratégicos. Averianova et al. (2020) utilizam a produção microbiana de riboflavina (vitamina B2) como um exemplo clássico para ilustrar que o entendimento da regulação biossintética determina a robustez e a eficiência industrial do processo. Paralelamente, Olszewska-Widdrat et al. (2023) observam que a fermentação de químicos-plataforma, como ácido láctico e succínico, tem avançado mediante estratégias de otimização que incorporam o reaproveitamento de coprodutos agroindustriais, conectando a inovação ao biorrefino e à economia circular.

Impulsionado pela pressão ambiental para a substituição de plásticos fósseis, cresce o interesse por biopolímeros como os poli-hidroxialcanoatos (PHAs). Em revisões recentes, Murawski de Mello et al. (2024) e Wang et al. (2026) ressaltam que a competitividade dos PHAs depende tanto da engenharia de linhagens quanto do aproveitamento de substratos de baixo custo, exigindo o desenho de processos mais eficientes e integrados.

No setor da saúde, embora os antibióticos permaneçam como um legado notável, a crise de resistência antimicrobiana exige renovação tecnológica. Singh et al. (2021) e Jeong et al. (2024) apontam a mineração genômica e a ativação de clusters biossintéticos silenciosos em actinobactérias como estratégias centrais para revelar metabólitos



inacessíveis em condições convencionais. Complementarmente, Ramos-Vega et al. (2025) e Baindara (2026) descrevem o fortalecimento da produção de vacinas em leveduras como uma alternativa de alta escalabilidade e menor custo, impulsionada por avanços na engenharia de glicosilação e no desenho racional de plataformas de expressão.

No cenário energético, Pereira et al. (2026) posicionam a fermentação de precisão como uma fronteira promissora para ampliar o espectro de compostos renováveis em biorrefinarias, aproximando o desempenho dos bioprodutos das exigências logísticas do mercado. Por fim, nas Ciências Agrárias, a expansão dos bioinsumos destaca-se como estratégia para a eficiência nutricional e a sustentabilidade produtiva. Contudo, Fadji et al. (2024) e Díaz-Rodríguez et al. (2025) alertam que a consolidação tecnológica ainda depende da estabilidade de formulação e da consistência de desempenho em campo, demandando uma integração estreita entre ciência, indústria e validação agrônômica.

### 3.4 Tecnologias Modernas e Etapas de Purificação

A transição de uma biotecnologia baseada na seleção empírica para uma abordagem guiada por dados e engenharia de precisão representa um dos marcos centrais da bioeconomia contemporânea. Revisões recentes, como as de Yan et al. (2024) e Xu et al. (2024), demonstram que a incorporação de tecnologias modernas permite projetar microrganismos com maior previsibilidade e desempenho industrial, acelerando o desenvolvimento de fábricas microbianas robustas e adaptadas a condições reais de processo. Nesse cenário, Cho et al. (2022) argumentam que a integração entre a seleção racional de chassis, a reconstrução de vias metabólicas e a otimização de fluxos tornou-se decisiva para ampliar o portfólio de bioprodutos e reduzir os gargalos de escalonamento.

Dentro desse panorama de inovação, a edição genética via CRISPR consolidou-se como o motor central da engenharia de microrganismos. Teng et al. (2023) destacam que essa ferramenta ampliou as possibilidades de regulação transcricional (CRISPRi/CRISPRa) e o controle de fluxos metabólicos, conferindo maior segurança e previsibilidade às aplicações industriais. Associada à edição, a biologia sintética expandiu a capacidade de programar comportamentos celulares e construir circuitos regulatórios voltados à estabilidade produtiva sob estresse. Além disso, Yan et al. (2023) apontam o interesse crescente por consórcios microbianos desenhados, nos quais diferentes espécies dividem tarefas metabólicas para aumentar a eficiência e permitir rotas de maior complexidade química. Para sustentar essa sofisticação, os mesmos autores defendem que as abordagens “ômicas” e a integração de dados multi-camada são indispensáveis para identificar gargalos e construir modelos preditivos, substituindo a tentativa-e-erro por estratégias orientadas por mecanismos.

Entretanto, a eficiência fermentativa isolada não garante a viabilidade econômica, pois o processamento *downstream* permanece crítico para o custo e a qualidade final. Janković et al. (2024; 2025) mostram que o desenho racional das etapas de separação e purificação é determinante para reduzir o consumo energético, principalmente em sistemas diluídos, elevando a recuperação e a competitividade industrial. Nessa direção, relatórios recentes do NREL (2025) destacam as tecnologias por membranas como alternativas relevantes para a recuperação econômica e mais sustentável de compostos orgânicos. Acompanhando essa modernização, Sathiyapriyan et al. (2025) observam que a adoção de *Process Analytical Technology* (PAT) transforma o controle de qualidade ao permitir o monitoramento em tempo real e elevar a conformidade regulatória. Assim, a biotecnologia microbiana contemporânea consolida-se como uma solução industrial estratégica, fundamentada na premissa de que a inovação tecnológica deve caminhar junto à segurança, rastreabilidade e integridade do processo.



#### 4. Considerações Finais

A biotecnologia microbiana consolidou-se como um pilar estratégico da bioeconomia, utilizando a diversidade de bactérias, fungos e microalgas como plataformas para a produção de compostos de alto valor, como enzimas, fármacos e bioinsumos. Essa versatilidade metabólica sustenta a inovação nas cadeias industriais e agrícolas, oferecendo alternativas eficazes para aumentar a eficiência produtiva e reduzir a dependência de recursos não renováveis.

Nesse contexto, os bioprocessos e o cultivo em biorreatores constituem o núcleo operacional da tecnologia, onde a integração entre microbiologia e engenharia define os limites de rendimento. O domínio rigoroso dos parâmetros físico-químicos e a escolha adequada dos modos de fermentação são fundamentais para assegurar a reprodutibilidade, o escalonamento seguro e a competitividade econômica frente aos processos tradicionais.

Por fim, o futuro da área é impulsionado pela incorporação de ferramentas avançadas, como CRISPR, biologia sintética e análises ômicas, associadas a etapas de recuperação (*downstream*) mais eficientes. Essa convergência tecnológica permite o desenvolvimento de microrganismos mais robustos e processos precisos, ampliando o papel da biotecnologia no atendimento às demandas globais por sustentabilidade, segurança e inovação.

#### Referências

- ANYAOHA, K. E. et al. Microalgae contribution in enhancing the circular economy by CO<sub>2</sub> capture and utilisation. *Cleaner Engineering and Technology*, 2024.
- AUGUSTIJN, H. E. et al. Unlocking silent biosynthetic gene clusters in *Streptomyces*. *Frontiers in Microbiology*, 2024.
- AVERIANOVA, L. A.; BALAKIREV, M. I. et al. Microbial production of riboflavin: a review. *Biotechnology Reports*, 2020.
- BAINDARA, P. Yeast-based vaccine platforms and advances in glycoengineering. *Vaccines*, 2026.
- BRASIL. Lei nº 15.070, de 23 de dezembro de 2024. Dispõe sobre a produção, registro, comercialização e incentivos à produção de bioinsumos. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 2024.
- CHANDRA, P. et al. Microbiais lipases: applications and industrial perspectives. *Biotechnology Reports*, 2020.
- CHAUDHARY, R. et al. Microbial cell factories: biodiversity, pathway engineering and applications. *BioTech*, 2024.
- CHO, J. S. et al. Designing microbial cell factories for the production of chemicals from renewable carbon. *JACS Au*, 2022.





- DAMBRUIN, M. et al. Optical sensors and real-time monitoring in bioprocessing: advances for PAT implementation. *Bioengineering*, 2025.
- DÍAZ-RODRÍGUEZ, A. M. et al. Microbial inoculants in agriculture: challenges from lab to field. *Frontiers in Plant Science*, 2025.
- FADIJI, A. E. et al. Biofertilizers and biocontrol agents: adoption barriers and field performance. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2024.
- GENG, Y. et al. Microalgae biorefineries: productivity, harvesting and circular economy integration. *Bioresource Technology*, 2025.
- GERZON, G. et al. Process analytical technology (PAT) in bioprocessing. *Trends in Biotechnology*, 2022.
- HAMID NOUR, A. et al. Innovative strategies for microalgae-based bioproduct extraction and processing. *Sustainability*, 2024.
- HERWIG, C. Continuous bioprocessing: trends and industrial implementation. *Current Opinion in Biotechnology*, 2021.
- ISOKO, F. et al. Bioprocessing 4.0: monitoring, digitalization and risk management for robust production. *Digital Discovery*, 2024.
- JANKOVIĆ, M. et al. Downstream process intensification and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 2025.
- JANKOVIĆ, M. et al. Energy-efficient downstream processing in biomanufacturing. *Separation and Purification Technology*, 2024.
- JEONG, Y. et al. Genome mining for novel antibiotics from actinobacteria. *Biotechnology Advances*, 2024.
- Jiang, Y. Synthetic biology circuits for robust microbial cell factories under industrial stress. *Trends in Microbiology*, 2025.
- KHAN, M. F. et al. Recent advances in microbial enzyme applications for sustainable textile processing. *Textiles*, 2025.
- KHOSRAVI, H. et al. Exploring the landscape of biofertilizers containing plant growth-promoting rhizobacteria. 2024.
- KIM, H. J. et al. A comprehensive evaluation of the capacities of microbial cell factories. *Nature Communications*, 2025.
- KOPP, J.; SLANINA, F. et al. Repetitive fed-batch strategies in microbial bioprocessing. *Biotechnology and Bioengineering*, 2020.



- LU, Z. et al. Morphological engineering of filamentous fungi. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2024.
- MARIAM, I. et al. Data-driven synthetic microbes for a sustainable future. *npj Systems Biology and Applications*, 2025.
- MITRA, S.; MURTHY, G. S. Bioreactor control systems in the biopharmaceutical industry: a critical perspective. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 2022.
- MURAWSKI DE MELLO, M. et al. Polyhydroxyalkanoates (PHAs): advances and challenges. *Biotechnology Advances*, 2024.
- NEUGEBAUER, P. et al. Process analytical technology in downstream-processing of drug substances: a review. 2024.
- NREL (National Renewable Energy Laboratory). Membrane separations for bioproduct recovery. Relatório técnico. 2025.
- OLSZEWSKA-WIDDRAT, A. et al. Microbial production of organic acids from renewable resources. *Biotechnology Advances*, 2023.
- PALLADINO, A. et al. Bioreactors: applications and innovations for a sustainable and healthy future. *Applied Sciences*, 2024.
- PEREIRA, F. B. et al. Precision fermentation and biorefineries for biofuels. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2026.
- RAMOS-VEGA, A. et al. Yeast-based vaccine manufacturing: scalable platforms and glycoengineering. *Vaccine*, 2025.
- RATHORE, A. S. Bioprocess development: principles and industrial perspectives. *Biotechnology Journal*, 2021.
- REARDON, K. F. Practical monitoring technologies for cells and substrates in biomanufacturing. *Current Opinion in Biotechnology*, 2021.
- SAMBUICHI, R. H. R.; POLICARPO, M. A.; ALVES, F. A produção de bioinsumos no Brasil: desafios e potencialidades. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental, Brasília*, n. 32, p. 57-65, 2024.
- SATHIYAPRIYAN, T. et al. Process analytical technology (PAT) in downstream processing. *Trends in Biotechnology*, 2025.
- SINGH, S. et al. Genome mining and activation of silent biosynthetic gene clusters for antibiotics discovery. *Microbiological Research*, 2021.
- SUBRAMANIAN, V. et al. From the bench to the reactor: engineered filamentous fungi. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 2025.



- TENG, X. et al. CRISPRi/CRISPRa and metabolic control in industrial microorganisms. Biotechnology Advances, 2023.
- WANG, Y. et al. PHA biopolymers: microbial synthesis and scale-up perspectives. Biotechnology Advances, 2026.
- XIE, D. et al. Continuous fermentation and industrial efficiency in biomanufacturing. Trends in Biotechnology, 2022.
- XU, P. et al. Strategies to increase the robustness of microbial cell factories. 2024.
- YAN, W. et al. Design and construction of microbial cell factories based on systems biology. Advanced Science, 2023.
- YAN, X. et al. Microbial cell factories in the bioeconomy era. BioDesign Research, 2024