

## APLICAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE IMOBILIZAÇÃO CELULAR EM BIOPROCESSOS: UMA BREVE REVISÃO DA LITERATURA

Kauana Vitória Ricardo dos Santos<sup>1</sup>, Filipe Soares de Freitas<sup>2</sup>, Letícia Rocha Almeida Abreu<sup>2</sup>, Natália Rosa Novaes<sup>2</sup>, Lílian de Araújo Pantoja<sup>2</sup>, Alexandre Soares dos Santos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, Brasil

(kauana.ricardo@ufvjm.edu.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, Brasil

**Resumo:** A imobilização celular é uma estratégia muito utilizada em bioprocessos. Este trabalho teve por objetivo revisar estudos que abordam a aplicação de microrganismos e o potencial das técnicas de imobilização na otimização de processos, tais como, produção de etanol, enzimas, biopigmentos e outros compostos. As técnicas proporcionam maior estabilidade, reutilização e produtividade dos biocatalisadores, sendo uma alternativa viável e eficiente em processos industriais sustentáveis.

**Palavras-chave:** Alginato; Biocatalisadores; Fermentação; Leveduras; Matriz polimérica.

### INTRODUÇÃO

Os bioprocessos (operações conduzidas por agentes biológicos), têm se destacado como uma alternativa sustentável e inovadora para uma ampla gama de aplicações industriais e científicas (Cardozo, 2023). A maior parte das pesquisas nessa área se concentram na compreensão dos mecanismos de produção, com o objetivo de selecionar o biocatalisador mais apropriado, determinar as condições ambientais ideais para maximizar o rendimento e identificar recursos economicamente mais viáveis (Souza, 2025).

A utilização de biocatalisadores específicos é uma característica fundamental dos bioprocessos industriais (Rosa et al., 2021). Nesse contexto, a imobilização celular tem se destacado como uma técnica inovadora e amplamente explorada, apresentando grande potencial para atender às demandas do setor industrial e contribuir para o aumento da produtividade (Coutinho, 2020).

A imobilização consiste em uma técnica na qual o biocatalisador é confinado em uma matriz insolúvel, possibilitando sua recuperação e reutilização após um determinado processo (Bié et al., 2022). O material suporte (matriz) deve apresentar propriedades específicas, tais como inércia química, resistência mecânica, estabilidade operacional, possibilidade de renovação e baixo custo (Rodríguez-Restrepo e Orrego, 2020).

A imobilização pode ocorrer por meio de revestimentos naturais ou sintéticos, sendo que a matriz imobilizante restringe o deslocamento celular, independentemente do meio em que se encontra e assim as células imobilizadas mantêm a capacidade

de realizar os mesmos processos metabólicos observados na forma livre (Kovaleski et al., 2020).

A eficiência de um sistema de imobilização depende de fatores físicos, bioquímicos e das técnicas empregadas, que podem variar de acordo com a aplicação específica (Ramalho, 2021). O ideal para a imobilização celular é que esta apresente características como reutilização eficiente, facilidade de separação das células, viabilidade econômica, não causar danos às células e suportar altas densidades celulares, entre outros requisitos (Vieira, 2025).

A imobilização celular vem sendo estudada há cerca de 35 a 40 anos (Silveira, 2021) e, atualmente, essa tecnologia tem sido amplamente aplicada em bioprocessos voltados para diversas áreas, como governança ambiental, fermentação de alimentos, geração de energia e desenvolvimento de fármacos (Guo et al., 2020).

O presente estudo tem como objetivo realizar um levantamento bibliográfico com o intuito de abordar os principais aspectos relacionados à aplicação da estratégia de imobilização celular em diferentes bioprocessos.

### MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido por meio de buscas conduzidas em bases de dados como Science Direct, PubMed, SciELO e periódicos da CAPES, utilizando os seguintes descritores: “cell immobilization”, e “bioprocess immobilization”. A seleção dos artigos considerou publicações entre os anos de 2020 e 2025, nos idiomas inglês, espanhol e português. Foram adotados como critérios de inclusão a relevância para o tema, a adequação ao escopo da pesquisa e a

disponibilidade de acesso ao texto completo por meio da assinatura institucional. As referências bibliográficas presentes nos artigos selecionados também foram analisadas com o intuito de complementar a busca.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A imobilização surgiu como uma alternativa à imobilização de enzimas, eliminando a necessidade de extração, isolamento e purificação (Khan, 2021; Oliveira et. al, 2022). Desde então, a imobilização tem avançado significativamente, tornando a produção de metabólitos microbianos mais eficiente (Barcellos, 2024).

O avanço e a criação de novas técnicas de imobilização celular, juntamente com a utilização de materiais mais modernos como suporte, têm possibilitado a realização de processos fermentativos com células imobilizadas mesmo sob condições desfavoráveis de pH, esterilidade e agitação (Silva et. al, 2022).

As técnicas tradicionais de imobilização celular podem ser divididas em duas categorias: naturais e sintéticas (Araújo, 2022). As naturais envolvem a formação de biofilmes e a adesão ou adsorção de microrganismos em suportes naturais, as sintéticas englobam métodos como a encapsulação em matriz, como o alginato de cálcio, ou o uso de agentes ligantes (Kovaleski e Bittencourt, 2020).

O estudo de Soares et al. explorou o uso de géis híbridos de alginato de cálcio para imobilizar leveduras recombinantes consumidoras de xilose, visando melhorar a tolerância a inibidores. O desempenho da levedura na fermentação de xilose foi avaliado sob diferentes concentrações de ácido acético (0 a 12 g L<sup>-1</sup>) e em lotes repetidos de hidrolisado de hemicelulose de bagaço de cana-de-açúcar bruto. A levedura imobilizada em géis híbridos demonstrou melhorar significativamente o desempenho da levedura na presença de 12 g L<sup>-1</sup> de ácido acético, resultando em uma produtividade de 1,13 g L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> e atingindo 75% do rendimento teórico de etanol. Houve uma melhoria de 32% na taxa de consumo de xilose. Além disso, o gel híbrido de alginato-quitosana permitiu um desempenho superior da levedura no hidrolisado bruto, possibilitando um lote extra de fermentação em comparação com as esferas de alginato puro. Esses resultados indicam o grande potencial dos géis híbridos para aumentar a produtividade do etanol de segunda geração (2G) e permitir a reciclagem celular por períodos mais longos.

Ariyajaroenwong et al. (2022) investigaram a influência da microaeração na fermentação do suco de colmo de sorgo sacarino utilizando células

imobilizadas de *Saccharomyces cerevisiae* NP01 em um biorreator tubular de leito empacotado. As melhores condições resultaram em uma concentração máxima de etanol de 106,9 g L<sup>-1</sup> e uma produtividade de 1,78 g L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, com um consumo de açúcar de 89,9%, sob taxa de aeração de 0,35 vvm durante 12 horas. Esses autores ainda observaram que a operação em modo contínuo, com taxa de aeração fixa de 0,05 vvm, a concentração inicial de açúcar e a taxa de diluição foram otimizadas por meio da metodologia de superfície de resposta (RSM), visando o aumento simultâneo dos parâmetros. As condições ideais encontradas foram uma concentração inicial de açúcar de 160 g L<sup>-1</sup> e uma taxa de diluição de 0,05 h<sup>-1</sup>, resultando em consumo de açúcar de 90,8%, concentração de etanol de 75,4 g L<sup>-1</sup> e produtividade de 3,72 g L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>.

Prado et al. (2024) propuseram uma nova abordagem para o pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar, baseada na cavitação hidrodinâmica assistida, integrada a um processo de sacarificação e cofermentação simultâneas (SSCF) conduzido em colunas interconectadas com células de *Scheffersomyces parashehatae* imobilizadas em alginato. As variáveis que influenciam o desempenho do pré-tratamento foram avaliadas por meio de planejamento estatístico, sendo identificado que uma vazão de ozônio de 10 mg min<sup>-1</sup> e pH 5,10 proporcionaram rendimentos de hidrólise de glucana e xilana de 86% e 72%, respectivamente, na etapa subsequente de hidrólise enzimática. Sob essas condições otimizadas, a adição de sulfato de ferro (15 mg L<sup>-1</sup>) permitiu a aplicação do pré-tratamento tipo Fenton, elevando os rendimentos de hidrólise para 92% (glucana) e 71% (xilana), em um tempo de apenas 10 minutos. No processo SSCF, foram obtidas produtividades volumétricas de etanol de 0,33 g L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> e 0,54 g L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> nos modos de operação em batelada e batelada alimentada, respectivamente, alcançando uma concentração final de etanol de 26 g L<sup>-1</sup> em 48 horas no modo alimentado.

Em estudo conduzido por Liang et al. (2020), os autores observaram que a fermentação baseada em biofilme como uma estratégia inovadora de imobilização celular, destacando suas vantagens em comparação à imobilização tradicional em alginato de cálcio. Essa abordagem demonstrou ser promissora para aplicações industriais, devido à sua elevada produtividade, maior resistência a condições ambientais adversas e viabilidade em processos contínuos de fermentação. As principais diferenças entre as duas técnicas referem-se aos estágios do ciclo celular das células imobilizadas. No estudo, os autores caracterizaram o fenótipo celular de *Saccharomyces cerevisiae* durante a fermentação em biofilme e compararam os estágios do ciclo celular com aqueles observados na imobilização em alginato

de cálcio. A fermentação baseada em biofilme, a maioria das células aderidas às fibras de algodão utilizadas como suporte encontrava-se predominantemente na fase G2/M do ciclo celular, enquanto as células imobilizadas em alginato estavam majoritariamente na fase G1/G0. A deleção do gene RIM15, envolvido na regulação do ciclo celular em resposta ao estado nutricional, reduziu a parada celular típica das células encapsuladas em alginato, promovendo uma maior formação de biofilme e um desempenho fermentativo superior. Esse aumento na formação de biofilme observado na cepa rim15 $\Delta$  foi atribuído à elevação na expressão da proteína de adesão FLO11 e à intensificação da síntese de trealose. Os resultados sugerem que as diferenças entre os dois sistemas de imobilização decorrem principalmente das condições do microambiente extracelular, e que o gene RIM15 exerce papel crucial na regulação da progressão do ciclo celular sob essas condições.

Khanpanuek et al. (2022) destacaram a reutilização de biocatalisadores e a operação em batelada repetida como estratégias promissoras para a redução de tempo e custos em processos fermentativos. No estudo, foi avaliada a aplicação de  $\alpha$ -amilase, glucoamilase e células de *Saccharomyces cerevisiae* imobilizadas em celulose bacteriana (BC) em um processo de sacarificação e fermentação simultâneas (SSF) conduzido em bateladas repetidas para a produção de etanol a partir do bagaço de mandioca (CP). As proporções entre  $\alpha$ -amilase e glucoamilase imobilizadas, bem como a concentração de CP, foram otimizadas visando máxima eficiência de sacarificação. As enzimas e células imobilizadas foram reutilizadas em quatro ciclos, totalizando cinco bateladas consecutivas de SSF. A condição ótima foi estabelecida com uma proporção enzimática de 75:25 (m/m) e concentração de CP de 60 g L $^{-1}$ , resultando em um rendimento de 0,74 g de glicose por g de CP, correspondente a 80% de eficiência de hidrólise. O processo de SSF em batelada repetida apresentou rendimento global de etanol de 0,28 g g $^{-1}$  CP e taxa de produção de 0,27 g h $^{-1}$ , enquanto o processo em batelada simples resultou em rendimento de 0,30 g gCP e taxa de produção de 0,036 g h $^{-1}$ . Os resultados obtidos demonstram a viabilidade da utilização da celulose bacteriana como suporte para imobilização de enzimas e células, além de confirmarem o potencial do processo SSF em batelada repetida para aplicações em fermentação etanólica.

O estudo conduzido por Ndubuisi et al. (2020) a levedura termotolerante *Pichia kudriavzevii* LC375240 foi imobilizada em três tipos de suportes (esferas de alginato de cálcio, resíduos de coco e sabugos de milho. A aderência celular foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura, revelando que os sabugos de milho proporcionaram maior

eficiência de imobilização, com grande número de células aderidas, morfologia celular preservada e melhor distribuição em comparação aos demais suportes. A eficiência da imobilização foi validada em fermentações em batelada repetida com glicose a 100 g L $^{-1}$  e temperatura de 42 °C. Os principais resultados observados foram que os suportes de sabugos de milho mantiveram produtividade de etanol constante (1,1 g L $^{-1}$  h $^{-1}$ ) ao longo de quatro ciclos, com concentração final de etanol de 44,5 g L $^{-1}$  no quarto ciclo e rendimento de 87,1% em relação ao teórico. Os suportes de resíduos de coco apresentaram boa produtividade de etanol nos dois primeiros ciclos (1,1 g L $^{-1}$  h $^{-1}$ ), mas queda significativa no quarto ciclo (0,9 g L $^{-1}$  h $^{-1}$  e 36,0 g L $^{-1}$ ). O suporte de alginato de cálcio resultou em menor fixação celular e produtividade de etanol instável, com desempenho semelhante às células livres nos três primeiros ciclos, mas queda significativa no quarto ciclo (0,9 g L $^{-1}$  h $^{-1}$  e 34,9 g L $^{-1}$ ), provavelmente devido à ruptura das esferas. Comparadas às células livres, as células imobilizadas em sabugos de milho demonstraram maior estabilidade e resistência a compostos inibitórios presentes em hidrolisados lignocelulósicos, como furfural, ácido acético e ácido fórmico. Esses resultados destacam o potencial dos sabugos de milho como suporte barato, reutilizável e eficaz para a imobilização de *P. kudriavzevii*, visando aplicações industriais na produção de etanol de segunda geração.

Vieira et al. (2022) investigaram a produção de isopropanol-butanol-etanol (IBE) utilizando células de *Clostridium beijerinckii* DSM 6423 imobilizadas em bagaço de cana-de-açúcar, um material fibroso, renovável e de baixo custo. Para superar a limitação imposta pela inibição do butanol, que exige soluções diluídas de açúcar, os autores integraram ao sistema um processo de recuperação de produto a vácuo in situ. A fermentação foi conduzida em bateladas repetidas em um biorreator de 7 L com meio contendo 60 g L $^{-1}$  de glicose e cestos anulares concêntricos impressos em 3D preenchidos com o material suporte. Em três dos cinco ciclos realizados, observou-se conversão média de 86% da glicose e produtividade de IBE de 0,35 g L $^{-1}$  h $^{-1}$ , valores 30% e 17% superiores às culturas livres e imobilizadas sem vácuo, respectivamente. A concentração de IBE no condensado alcançou 45 g L $^{-1}$ , demonstrando a eficácia da recuperação integrada. Além disso, o trabalho propôs um novo conceito de biorreator de leito fibroso com circuito interno, impulsorado por ebulição, como alternativa promissora para processos fermentativos com células imobilizadas.

Liu et al. (2022) exploraram estratégias para melhorar a eficiência da produção de etanol por *Pichia kudriavzevii*, uma levedura termotolerante, em

condições de estresse causadas por inibidores comuns em hidrolisados lignocelulósicos. O estudo demonstrou que a imobilização celular em esferas de alginato de cálcio reduziu significativamente os efeitos tóxicos de compostos como furfural, HMF e ácidos orgânicos. As células imobilizadas mantiveram maior viabilidade e atividade fermentativa em comparação às células livres, especialmente sob temperaturas elevadas e em meio com alta concentração de inibidores. A imobilização também contribuiu para a reutilização das células em ciclos fermentativos repetidos, resultando em melhor estabilidade operacional e maior rendimento de etanol ao longo do tempo. Esses resultados destacam a imobilização como uma abordagem eficaz para melhorar a robustez da fermentação alcoólica em processos industriais que utilizam biomassa lignocelulósica.

Esawy et al. (2025) investigaram a aplicação da imobilização celular visando otimizar a produção de amilases por isolados bacterianos provenientes de mel. Os isolados identificados como *Bacillus velezensis* AMA2 e *Bacillus atrophaeus* AMA6, que apresentaram maior atividade amilolítica, foram imobilizados em esferas de alginato de sódio. A imobilização resultou em um aumento expressivo na produção enzimática: de 78 para 232 U mg<sup>-1</sup> em AMA2 e de 71 para 216 U mg<sup>-1</sup> em AMA6. Além do ganho na atividade, as células imobilizadas demonstraram maior estabilidade operacional, mantendo 85% e 53% da produção de amilase após sete ciclos de reutilização. A imobilização também alterou as condições ótimas de operação, aumentando a temperatura ideal de 40 °C para 45 °C e ajustando o pH ótimo de 7 para 6. As células imobilizadas mostraram-se mais resistentes a variações de temperatura e pH, em comparação com as células livres. Outro benefício observado foi a redução da energia de ativação após a imobilização, o que favorece a eficiência catalítica dos bioprocessos. Esses resultados evidenciam que a imobilização celular, além de potencializar a produção enzimática, contribui para a estabilidade e reutilização do biocatalisador, representando uma estratégia promissora para aplicações industriais.

Moraes et al. (2024) desenvolveram e avaliaram a imobilização de microalgas em matrizes híbridas de sílica/algínato como uma alternativa sustentável para a captura seletiva de CO<sub>2</sub> de misturas de gás natural. Essa abordagem visa superar desafios operacionais do cultivo livre, como a difícil separação das células e a perda de viabilidade em condições adversas. Três tipos de matrizes foram sintetizados com diferentes combinações de precursores de sílica, sendo a matriz composta por silicato e sílica coloidal a que apresentou melhor desempenho em termos de transparência, porosidade e manutenção da

viabilidade celular. Utilizando um sistema pressurizado estático, as microalgas imobilizadas demonstraram uma eficiência de remoção de CO<sub>2</sub> de 41,4%, superior à observada com microalgas livres (32,9%). Os resultados evidenciam que a imobilização é uma estratégia promissora para aplicações industriais de purificação de gás natural, contribuindo para processos mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.

Tao et al. (2022) investigaram a imobilização de bactérias ácido-láticas (BAL) para otimizar a produção de polissacarídeos extracelulares (EPS). Seis cepas, incluindo *Lactobacillus plantarum*, foram testadas com diferentes suportes (alginato, ágar, gelatina-glutaraldeído e carragenina). O ágar apresentou melhor desempenho como carreador. As condições ideais foram: 3% de inóculo, 30 g L<sup>-1</sup> de ágar com esferas de 1 cm, a 37 °C por 24 h, resultando em um rendimento máximo de 1489,9 mg L<sup>-1</sup> de EPS. A imobilização mostrou-se eficaz para melhorar a fermentação e facilitar a recuperação dos polissacarídeos.

O estudo conduzido por Arruda et al. (2025) avaliou oito suportes naturais alternativos como matrizes para a imobilização de *Monascus ruber* e verificou o reuso dessas células imobilizadas na produção de biopigmentos. Os materiais que apresentaram maior capacidade de imobilização foram o pecíolo da folha de bananeira (0,65 g g<sup>-1</sup>), o bagaço de cana-de-açúcar (0,58 g g<sup>-1</sup>) e a esponja bucha vegetal (0,57 g g<sup>-1</sup>), sendo observada baixa liberação de células livres no meio ao final do cultivo. A preferência do fungo pela adsorção nesses suportes foi influenciada por características como a estrutura microscópica da biomassa, a taxa de intumescimento e a composição química dos materiais. A adsorção dos biopigmentos aos suportes foi considerada insignificante, indicando pouca interação entre os compostos produzidos e a matriz de crescimento. O reuso celular demonstrou estabilidade dos sistemas de imobilização, com manutenção da baixa concentração de células livres (<0,5 g L<sup>-1</sup> no terceiro ciclo) e ausência de fase de latência tanto na produção de pigmentos quanto no consumo de xilose. Os valores máximos obtidos de biopigmentos foram de 13,4 UA (amarelo), 14,6 UA (laranja) e 15,8 UA (vermelho). Dessa forma, a estratégia proposta se mostrou promissora para o desenvolvimento de processos e produtos mais sustentáveis.

Khumsupan et al. (2025) desenvolveram um novo suporte para imobilização celular utilizando impressão 3D, com o objetivo de imobilizar a levedura termotolerante *Kluyveromyces marxianus* para a produção de bioetanol. O suporte impresso foi revestido com resíduo de farelo de soja, o que promoveu a introdução de novos grupos funcionais e aumentou significativamente a rugosidade superficial

do material ( $p < 0,05$ ). A fermentação utilizando os moldes revestidos e com células imobilizadas apresentou melhorias expressivas ( $p < 0,05$ ) na produção e na produtividade de bioetanol, passando de  $37 \text{ g L}^{-1}$  e  $1,71 \text{ g L}^{-1} \text{ h}^{-1}$  em culturas em suspensão para  $45 \text{ g L}^{-1}$  e  $2,82 \text{ g L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , o que representa um aumento de 11% no rendimento teórico e de 60% na produtividade. Além disso, após 30 ciclos de fermentações em batelada repetidas, tanto o rendimento quanto a produtividade mantiveram-se estáveis, evidenciando a resistência física e a estabilidade do sistema. Esses resultados demonstram o potencial dos suportes impressos em 3D e revestidos com farelo de soja como uma estratégia promissora e comercialmente viável para a imobilização celular na produção de bioetanol.

### CONCLUSÃO

O presente estudo evidenciou que a imobilização celular é uma estratégia promissora e eficaz para a otimização de diversos bioprocessos industriais, destacando-se pela capacidade de aumentar a produtividade, a estabilidade operacional e a reutilização das células..

Os trabalhos analisados demonstraram que diferentes tipos de suportes influenciam diretamente no desempenho do sistema, sendo fundamentais na proteção das células frente a condições adversas, como presença de inibidores e variações de temperatura e pH. As células imobilizadas apresentaram vantagens significativas em comparação às livres, incluindo maior viabilidade, resistência, facilidade de separação e manutenção da atividade metabólica ao longo de múltiplos ciclos.

Além disso, a aplicação da imobilização em contextos como a produção de etanol de segunda geração, biopigmentos, enzimas e processos de purificação de gases reforça seu potencial para o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis e economicamente viáveis na indústria biotecnológica.

### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradecemos também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis (UFVJM/UFU), à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) e ao Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT/UFVJM), pelo suporte institucional, infraestrutura e incentivo à pesquisa científica.

### REFERÊNCIAS

ALVES, E. H. et al. Otimização de processo biotecnológico utilizando resíduo da indústria cervejeira na produção da enzima Tanase. *J Revista Univap*, v. 26, n. 52, p. 1-15, 2020.

ARAUJO, T. M. **Fisiologia e modelagem matemática de *saccharomyces spp.* imobilizadas para produção de cerveja**. 2021. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ARIYAJAROENWONG, P. et. al. Improvement of batch and continuous ethanol fermentations from sweet sorghum stem juice in a packed bed bioreactor by immobilized yeast cells under microaeration. *Bioresource Technology Reports*, v. 17, p. 100908, 2022.

ARRUDA, G. L. et al. Alternative natural supports for the immobilization of *Monascus ruber*: Reuse of cells and production of biopigments in submerged fermentation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 13, n. 3, p. 116359, 2025.

BARCELLOS, B. S. C. **Imobilização de microalgas em polímeros orgânicos e inorgânicos para remoção de nutrientes**. 2024.

BIÉ, J. et al. Enzyme Immobilization and Co-Immobilization: Main Framework, Advances and Some Applications. *Processes*, v. 10, n. 3, p. 494, 1 mar. 2022.

CARDOZO, M. H. A. D. L. A engenharia de bioprocessos na promoção da sustentabilidade: Uma análise das produções recentes. *Sustentare & Wipis*:Universidade Federal de São João del-Rei 2023.

ESAWY, M. A. et al. Comparative study between the free and immobilized cells of *Bacillus velezensis* AMA2 P164707 and *Bacillus atropphaeus* AMA6 OP225343 for acidic  $\beta$ ,  $\alpha$  amylases production and applied experiment. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 284, p. 138087, 2025.

KHAN, M. R. Immobilized enzymes: a comprehensive review. *Bulletin of the National Research Centre*, v. 45, n. 1, dez. 2021.

KHANPANUEK, S. et al. Repeated-batch simultaneous saccharification and fermentation of cassava pulp for ethanol production using amylases and *Saccharomyces cerevisiae* immobilized on bacterial cellulose. *Biochemical Engineering Journal*, v. 177, p. 108258, 2022.

KHUMSUPAN, D. et al. Creating a robust and reusable cell immobilization system for bioethanol production by thermotolerant yeast using 3D printing and soybean waste. *Industrial Crops and Products*, v. 224, p. 120434, 2025.

KOVALESKI, G.; BITTENCOURT, J. V. M.; RODRIGUES, S. A. Estudo da imobilização celular de *Saccharomyces cerevisiae* em alginato de cálcio. Ponta Grossa, PR: AYA Editora, 2020.70 ISBN 6588580037.

KONG, D. et al. A combined immobilization system for high-solids cellulosic ethanol production by simultaneous saccharification and fermentation. **Renewable Energy**, v. 241, p. 122304, 2025.

LIANG, C. et al. Fermentação baseada em biofilme: uma nova estratégia de imobilização para a progressão do ciclo celular de *Saccharomyces cerevisiae* durante a produção de etanol. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 104, n. 17, p. 7495-7505, 2020.

LIU, J. et al. Biodiesel production in a magnetically fluidized bed reactor using whole-cell biocatalysts immobilized within ferroferric oxide-polyvinyl alcohol composite beads. **Bioresource Technology**, v. 355, p. 127253, 2022.

MIRANDA, L. M. Sobre história, sustentabilidade e crise energética. **Revista Brasileira de História**, v. 43, p. 15-28, 2023.

MORAES, J. C. et al. IMMOBILIZING MICROALGAE IN HYBRID MATRICES AS A GREEN TECHNOLOGY FOR NATURAL GAS SWEETENING USING NOVEL STATIC SYSTEM. **Química Nova**, v. 47, n. 8, p. e-20240035, 2024.

NDUBUISI, I. A. et al. Efeitos de várias substâncias inibidoras e imobilização na eficiência da produção de etanol de uma *Pichia kudriavzevii* termotolerante. **Biotecnologia para biocombustíveis**, v. 13, n. 1, p. 91, 2020.

OLIVEIRA, T. M F. S. et al. Processos de imobilização de enzimas visando aplicação biotecnológica. **SICITAL**, 2022.

PRADO, C. A. et al. Hydrodynamic cavitation-assisted acid pretreatment and fed-batch simultaneous saccharification and co-fermentation for ethanol production from sugarcane bagasse using immobilized cells of *Scheffersomyces parashehatae*. **Bioresource Technology**, v. 394, p. 130234, 2024.

RAMALHO, E. X. **Imobilização por ligação covalente de uma protease de *Bacillus licheniformis* em quitosana e sua aplicação na hidrólise de proteínas**. 2021. Tese de Doutorado.

RODRÍGUEZ-RESTREPO, Y. A.; ORREGO, Carlos E. Immobilization of enzymes and cells on lignocellulosic materials. **Environmental Chemistry Letters**, v. 18, n. 3, p. 787-806, 2020.

SILVA, M. D. et al. Utilização de hidrolisado de sabugo de milho para produção de etanol de segunda geração por imobilização de *Saccharomyces cerevisiae* ATCC 26602. In: OPEN SCIENCE RESEARCH IX. **Editora Científica Digital**, 2022. p. 252-271.

SOARES, R. C. et al. Cell immobilization using alginate-based beads as a protective technique against stressful conditions of hydrolysates for 2G ethanol production. **Polymers**, v. 14, n. 12, p. 2400, 2022.

SOUZA, Y. N. **Bioprospecção de leveduras selvagens e imobilização em alginato de cálcio para produção de etanol**. 2025. 77f. Trabalho de Conclusão de Curso - Monografia (Curso de Bacharelado em Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos) - Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, Universidade Federal de Campina Grande - Campus Sumé - Paraíba - Brasil, 2025.

TAO, Jing et al. Immobilization of Lactic acid bacteria for production of extracellular polysaccharides. **Food Science and Technology**, v. 42, p. e99021, 2022.

VIEIRA, C. F. S. et al. Isopropanol-butanol-ethanol production by cell-immobilized vacuum fermentation. **Bioresource Technology**, v. 344, p. 126313, 2022.

VIEIRA, S. S. **Estudo da imobilização celular da microalga Chlorella vulgaris em diferentes concentrações de alginato de sódio**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.