



CARVÃO ATIVADO E IMOBILIZAÇÃO DE CELULASES EM PROCESSOS DE BIOENERGIA 2G: REVISÃO INTEGRATIVA

CARBÓN ACTIVADO E INMOVILIZACIÓN DE CELULASAS EN PROCESOS DE BIOENERGÍA 2G: REVISIÓN INTEGRATIVA

ACTIVATED CARBON AND CELLULASE IMMOBILIZATION IN 2G BIOENERGY PROCESSES: AN INTEGRATIVE REVIEW

Apresentação: Comunicação Oral

Isaac Matheus de Jesus Silva¹; Aryanna Sany Pinto Nogueira Costa²; Beatriz do Nascimento Oliveira³ Carlos Arthur Bertoldo de Araujo⁴; Emeson Farias Araujo Santos⁵

DOI: <https://doi.org/10.31692/VICIAGRO.0144>

RESUMO

A crescente demanda por fontes renováveis de energia tem impulsionado intensamente o desenvolvimento de tecnologias avançadas voltadas à produção de etanol de segunda geração (2G), derivado da conversão eficiente de biomassa lignocelulósica. Entretanto, o uso de celulases, enzimas fundamentais nesse processo, enfrenta desafios significativos relacionados à estabilidade enzimática, alto custo de produção e dificuldades no reaproveitamento das enzimas após o uso. Nesse contexto, a imobilização enzimática em suportes sólidos vem se destacando como uma estratégia promissora para superar essas limitações, proporcionando maior durabilidade e reutilização das celulases, além de contribuir para a viabilidade econômica e sustentabilidade do processo. Este trabalho apresenta uma revisão integrativa da literatura científica, cujo objetivo principal foi analisar e sistematizar as diferentes técnicas de imobilização, com ênfase nos suportes sólidos empregados para imobilização de celulases aplicadas à produção de bioenergia 2G. A pesquisa foi conduzida em bases de dados renomadas como Scopus, Web of Science, ScienceDirect e Google Scholar, abrangendo estudos publicados entre 2015 e 2025. Foram selecionados trabalhos que abordam aspectos cruciais como eficiência catalítica, estabilidade térmica, reusabilidade das enzimas e seus impactos ambientais. Os resultados indicaram que, entre as técnicas avaliadas, o carvão ativado derivado de resíduos agroindustriais, como bagaço de cana, casca de arroz e caroço de açaí, apresenta alta área superficial, porosidade adequada e excelente compatibilidade com métodos de adsorção e ligação covalente, promovendo taxas de retenção enzimática superiores a 70% após múltiplos ciclos de uso. Além disso, estratégias complementares, como a modificação do suporte com polidopamina e a utilização de ativadores químicos, demonstraram eficácia significativa na melhoria da estabilidade térmica e do pH das celulases imobilizadas. Em processos de sacarificação, foi observada uma elevação de até 32% na liberação de açúcares fermentáveis, resultando em ganhos expressivos na produção de etanol. A reutilização das enzimas imobilizadas também contribuiu para a redução dos custos operacionais e do impacto ambiental do processo. Apesar dos avanços evidenciados, foram identificadas lacunas metodológicas importantes, falta de padronização nos protocolos e escassez de estudos em escala industrial. Dessa forma, conclui-se que a imobilização de celulases em carvão ativado é uma abordagem tecnicamente viável, ambientalmente sustentável e economicamente vantajosa, possuindo grande potencial para aplicação em biorrefinarias e sistemas integrados de bioenergia.

¹ Pós-Graduação em Química e Biotecnologia, UFAL, isaac.matheus75@hotmail.com

² Pós-Graduação em Química e Biotecnologia, UFAL, aryannaspn@gmail.com

³ Pós-Graduação em Química e Biotecnologia, UFAL, beatriz.oliveira@iqb.ufal.br

⁴ Bacharelado em Química, UFAL, carthurbertoldo@gmail.com

⁵ Mestre em Ciências, UFAL, emeson.santos@arapiraca.ufal.br

Palavras-Chave: imobilização enzimática, carvão ativado, celulase, bioenergia de segunda geração, etanol 2G.

RESUMEN

La creciente demanda por fuentes de energía renovables ha impulsado significativamente el desarrollo de tecnologías avanzadas orientadas a la producción de etanol de segunda generación (2G), derivado de la conversión eficiente de biomasa lignocelulósica. Sin embargo, el uso de celulasas, enzimas fundamentales en este proceso, enfrenta desafíos relevantes relacionados con la estabilidad enzimática, el alto costo de producción y la dificultad para su reutilización. En este contexto, la inmovilización enzimática sobre soportes sólidos surge como una estrategia prometedora para superar estas limitaciones, al proporcionar mayor durabilidad y reutilización de las celulasas, además de contribuir a la viabilidad económica y sostenibilidad del proceso. Este trabajo presenta una revisión integradora de la literatura científica, cuyo objetivo principal fue analizar y sistematizar diferentes técnicas de inmovilización, con énfasis en los soportes sólidos empleados para inmovilizar celulasas aplicadas a la producción de bioenergía 2G. La búsqueda se realizó en bases de datos reconocidas como Scopus, Web of Science, ScienceDirect y Google Scholar, abarcando estudios publicados entre 2015 y 2025. Se seleccionaron trabajos que abordaran aspectos clave como eficiencia catalítica, estabilidad térmica, reutilización enzimática e impactos ambientales. Los resultados indicaron que, entre las técnicas evaluadas, el carbón activado derivado de residuos agroindustriales, como bagazo de caña, cáscara de arroz y semilla de açai, presenta alta área superficial, porosidad adecuada y excelente compatibilidad con métodos de adsorción y enlace covalente, alcanzando tasas de retención enzimática superiores al 70% tras múltiples ciclos. Además, estrategias como la modificación con polidopamina y el uso de activadores químicos resultaron eficaces para mejorar la estabilidad térmica y el pH de las celulasas inmovilizadas. En procesos de sacarificación, se observó un aumento de hasta un 32% en la liberación de azúcares fermentables, con mejoras significativas en la producción de etanol. La reutilización de enzimas también contribuyó a la reducción de costos operativos e impacto ambiental. A pesar de los avances, se identificaron vacíos metodológicos, falta de estandarización y escasez de estudios a escala industrial. Se concluye que la inmovilización de celulasas en carbón activado es una alternativa técnica, ambiental y económicamente viable con alto potencial de aplicación en biorrefinerías y sistemas integrados de bioenergía.

Palabras Clave: inmovilización enzimática, carbón activado, celulasa, bioenergía de segunda generación, etanol 2G.

ABSTRACT

The growing demand for renewable energy sources has significantly driven the development of advanced technologies aimed at second-generation (2G) ethanol production, derived from the efficient conversion of lignocellulosic biomass. However, the use of cellulases—key enzymes in this process—faces major challenges related to enzyme stability, high production costs, and limited reusability. In this context, enzyme immobilization on solid supports emerges as a promising strategy to overcome these limitations by enhancing the durability and reusability of cellulases, while also contributing to the economic and environmental viability of the process. This paper presents an integrative literature review with the primary objective of analyzing and systematizing different immobilization techniques, focusing on solid supports used for cellulase immobilization in 2G bioenergy production. The research was conducted using well-established databases such as Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and Google Scholar, covering studies published between 2015 and 2025. Selected works addressed key aspects such as catalytic efficiency, thermal stability, enzyme reusability, and environmental impacts. Results indicated that among the evaluated techniques, activated carbon derived from agro-industrial residues, such as sugarcane bagasse, rice husk, and açai seed, exhibits high surface area, suitable porosity, and excellent compatibility with adsorption and covalent bonding methods, achieving enzyme retention rates above 70% after multiple cycles. Additionally, strategies such as polydopamine modification and the use of chemical activators proved effective in enhancing the thermal and pH stability of immobilized cellulases. During saccharification processes, up to a 32% increase in fermentable sugar release was observed, resulting in significant gains in ethanol production. Despite the progress, methodological gaps, lack of standardization, and scarcity of industrial-scale studies were identified. It is concluded that cellulase immobilization on activated carbon is a technically feasible, environmentally sustainable, and economically advantageous approach with strong potential for application in biorefineries and integrated bioenergy systems.

Keywords: enzyme immobilization, activated carbon, cellulase, second-generation bioenergy, 2G ethanol.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia renováveis e sustentáveis tem levado a uma intensificação das pesquisas sobre a produção de bioenergia, com ênfase no etanol. A bioenergia de primeira geração (1G), que utiliza matérias-primas alimentícias como milho, cana-de-açúcar e soja, tem sido a principal fonte de bioetanol nos últimos anos (Volpi; Fuess; Moraes, 2021). No entanto, a utilização desses recursos alimentares tem gerado sérias preocupações, principalmente em relação à segurança alimentar, concorrência com a produção de alimentos e aos impactos ambientais associados ao cultivo em grande escala dessas matérias-primas (Filho et al., 2023). Além disso, a produção de etanol 1G enfrenta limitações técnicas e econômicas, como a eficiência de conversão da biomassa e a competição com outros usos industriais desses produtos agrícolas (Iram; Cekmecelioglu; Demirci, 2022).

Diante desses desafios, a bioenergia de segunda geração (2G) se apresenta como uma alternativa promissora (Moonsamy et al., 2022). O etanol 2G é produzido a partir de resíduos lignocelulósicos, como bagaço de cana, palha, cascas de frutas, resíduos florestais e outros materiais não alimentícios. Essa abordagem não só diminui a pressão sobre os alimentos, mas também valoriza os resíduos agroindustriais, contribuindo para a sustentabilidade e a redução do impacto ambiental (Volpi; Fuess; Moraes, 2021). A hidrólise enzimática da celulose, por meio de enzimas como as celulasas (E.C. 3.2.1.X), é um dos processos-chave para a conversão eficiente da biomassa lignocelulósica em açúcares fermentáveis, essencial para a produção de etanol 2G (Filho et al., 2023).

No entanto, o processo de hidrólise enzimática enfrenta um gargalo técnico, que limita sua eficiência e viabilidade econômica (Volpi; Fuess; Moraes, 2021). A principal dificuldade reside na estabilidade das celulasas, enzimas que, embora sejam essenciais para a quebra da celulose, apresentam baixa estabilidade térmica e de pH, além de dificuldade em serem reutilizadas de maneira eficiente em ciclos sucessivos. Esse problema aumenta significativamente os custos operacionais dos processos de produção de etanol 2G, o que representa um obstáculo importante para a expansão comercial dessa tecnologia (Moonsamy et al., 2022).

A imobilização enzimática surge como uma solução promissora para contornar esses desafios, proporcionando aumento da estabilidade e reutilização das enzimas, resultando em processos mais econômicos e eficientes (Nahar et al., 2025). Dentre os suportes utilizados para a imobilização, o carvão ativado se destaca como uma alternativa eficaz, devido à sua alta superfície específica, porosidade e capacidade de adsorção, características ideais para fixar enzimas como as celulasas (Correia et al., 2024). Além disso, o uso de carvão ativado derivado de fontes renováveis, como resíduos agroindustriais, não só oferece vantagens técnicas, mas também alinha-se com os

princípios da economia circular, proporcionando uma solução sustentável tanto para a produção de bioenergia quanto para a gestão de resíduos (Ji et al., 2024).

Neste contexto, esta revisão integrativa teve como objetivo analisar as principais fontes de carvão ativado e sua aplicação como suporte para imobilização de celulases, com foco na produção de etanol de segunda geração. Através de uma análise crítica das técnicas de ativação do carvão, suas propriedades físico-químicas e a eficiência de hidrólise proporcionada pelas enzimas imobilizadas, este trabalho busca fornecer uma visão detalhada sobre as oportunidades e desafios dessa tecnologia para a indústria de bioenergia.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Bioenergia de Primeira Geração (1G)

A bioenergia de primeira geração (1G) refere-se à produção de biocombustíveis a partir de matérias-primas alimentícias, como milho, cana-de-açúcar, soja e trigo. Os processos mais comuns de produção envolvem a fermentação de açúcares presentes nessas plantas para gerar etanol e outros biocombustíveis (Filho et al., 2023). Uma das principais limitações da bioenergia de 1G é a competição direta com alimentos. A utilização de grãos e cultivos alimentares para a produção de biocombustíveis pode levar ao aumento dos preços dos alimentos, afetando a segurança alimentar em várias regiões do mundo (Iram; Cekmecelioglu; Demirci, 2022). Além disso, a expansão de plantações destinadas à produção de biocombustíveis pode contribuir para o desmatamento e a degradação do solo, além de aumentar o uso de fertilizantes e pesticidas, exacerbando os impactos ambientais associados à agricultura convencional. Esse modelo agrícola pode ser insustentável a longo prazo, especialmente em um cenário de mudanças climáticas e escassez de recursos naturais (Volpi; Fuess; Moraes, 2021).

A dependência da produção de alimentos para a obtenção de biocombustíveis também levanta questões socioeconômicas. Em muitas regiões, o uso de terras agrícolas para a produção de biocombustíveis pode comprometer a segurança alimentar da população, especialmente em países em desenvolvimento (Volpi; Fuess; Moraes, 2021). A inflação dos preços dos alimentos é uma consequência indireta dessa competição por recursos, o que pode tornar alimentos essenciais inacessíveis para populações mais vulneráveis, exacerbando desigualdades sociais e econômicas (Filho et al., 2023).

Bioenergia de Segunda Geração (2G)

A bioenergia de segunda geração (2G) refere-se à produção de biocombustíveis, especialmente bioetanol, a partir de biomassa lignocelulósica, ou seja, materiais ricos em celulose, hemicelulose e lignina, como bagaço de cana-de-açúcar, palha de arroz, casca de milho e outros

resíduos agroindustriais (Correia et al., 2024). Ao contrário da bioenergia de primeira geração (1G), que utiliza matérias-primas alimentícias, a 2G aproveita materiais que não competem diretamente com a produção de alimentos. Essa diferença torna a bioenergia 2G uma solução mais sustentável, pois utiliza resíduos agrícolas e florestais que, de outra forma, poderiam ser descartados ou gerar impactos ambientais negativos (Nahar et al., 2025).

A principal vantagem da bioenergia 2G é que ela não compete com a produção de alimentos. Isso é especialmente importante em um contexto de crescente demanda por alimentos e biocombustíveis, onde a concorrência por terras agrícolas pode gerar impactos econômicos e sociais negativos (Moonsamy et al., 2022). Além disso, a utilização de resíduos agroindustriais para a produção de etanol 2G promove uma gestão mais eficiente dos resíduos, minimizando o desperdício e contribuindo para a economia circular. Essa abordagem não só melhora a sustentabilidade do processo de produção de biocombustíveis, como também contribui para a redução do impacto ambiental, ao evitar o acúmulo de resíduos agrícolas e florestais (Filho et al., 2023).

O uso de biomassa lignocelulósica também tem implicações positivas para a redução das emissões de gases de efeito estufa (Volpi; Fuess; Moraes, 2021). Como as plantas que fornecem essa biomassa absorvem CO₂ durante seu crescimento, o processo de conversão em etanol resulta em um ciclo de carbono neutro, o que significa que as emissões geradas durante a produção de biocombustíveis são compensadas pela quantidade de carbono capturado pela planta. Isso torna o etanol 2G uma alternativa mais ecológica em comparação com os combustíveis fósseis, cuja combustão libera carbono armazenado na Terra há milhões de anos (Iram; Cekmecelioglu; Demirci, 2022).

O etanol 2G também apresenta vantagens do ponto de vista da eficiência de produção. Como a biomassa lignocelulósica é uma fonte abundante e de baixo custo, ela representa uma matéria-prima atrativa em termos econômicos (Iram; Cekmecelioglu; Demirci, 2022). Além disso, a produção de etanol 2G pode contribuir para a descentralização da geração de energia, permitindo que pequenos agricultores e comunidades rurais se beneficiem da utilização de resíduos locais para gerar bioenergia. Isso não apenas estimula a economia local, como também reduz a dependência de grandes corporações e de fontes externas de energia (Filho et al., 2023).

Apesar de suas muitas vantagens, a produção de etanol 2G enfrenta importantes desafios técnicos e econômicos. Um dos principais gargalos está na conversão da biomassa lignocelulósica em açúcares fermentáveis, processo essencial para a produção de etanol (Nahar et al., 2025). A estrutura complexa da celulose e da lignina torna a biomassa lignocelulósica difícil de ser quebrada, exigindo processos de hidrólise enzimática altamente eficientes (Correia et al., 2024). Contudo, essas enzimas, especialmente as celulasas, têm limitações em termos de estabilidade, custo e eficiência. A

necessidade de grandes quantidades de enzimas e de condições específicas de temperatura e pH contribui para o aumento do custo de produção do etanol 2G (Nahar et al., 2025).

Outro desafio significativo é a eficiência do processo de hidrólise enzimática. Embora as enzimas possam ser eficazes para a quebra da celulose, o tempo de reação necessário e a quantidade de enzimas exigida tornam o processo mais caro e demorado do que a hidrólise de fontes alimentícias, como o milho (Correia et al., 2024). A imobilização enzimática é uma solução proposta para mitigar esses desafios, pois permite a reutilização das enzimas em múltiplos ciclos, reduzindo os custos operacionais. No entanto, a escolha do suporte adequado para a imobilização de enzimas e o desenvolvimento de enzimas mais eficientes ainda representam áreas de intensa pesquisa (Nahar et al., 2025).

A escalabilidade da produção de etanol 2G também está associada a desafios econômicos. O custo inicial de infraestrutura para a conversão de biomassa lignocelulósica é elevado, e a eficiência de conversão ainda precisa ser melhorada para competir com o etanol de 1G e com os combustíveis fósseis em termos de custo por litro (Nahar et al., 2025). O avanço tecnológico, especialmente na engenharia genética de enzimas mais eficientes e na melhoria de processos de conversão, é crucial para superar essas barreiras e viabilizar a produção em larga escala de etanol 2G (Wang et al., 2024).

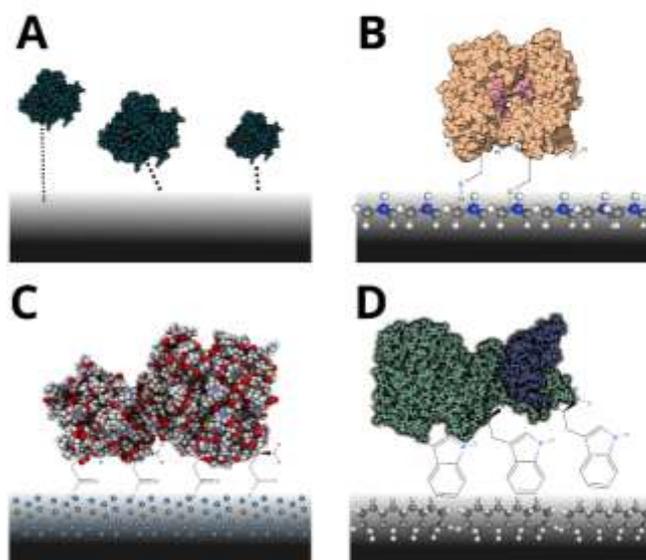
Imobilização Enzimática: Conceitos e Aplicações

A imobilização enzimática é um processo no qual enzimas são fisicamente ou quimicamente fixadas a um suporte sólido. Isso é feito com o objetivo de melhorar a estabilidade das enzimas e permitir sua reutilização em processos industriais (Bouguerra et al., 2024). Ao imobilizar as enzimas, elas podem ser separadas facilmente dos produtos da reação, o que facilita a recuperação e diminui o custo operacional do processo. Além disso, a imobilização oferece uma maior resistência a condições ambientais severas, como variações de temperatura e pH, o que torna as enzimas mais eficazes em processos contínuos e de larga escala, como na produção de bioenergia e biocombustíveis (Ji et al., 2024).

O processo de imobilização aumenta significativamente a vida útil das enzimas, uma vez que, ao estar fixa em um suporte, a enzima sofre menor degradação durante o processo de reação. Isso é particularmente útil em indústrias como a de alimentos, farmacêutica, química e bioenergia, onde as enzimas podem ser usadas repetidamente em múltiplos ciclos, reduzindo o custo total do processo (Iram; Cekmecelioglu; Demirci, 2022). Além disso, a imobilização pode otimizar a cinética das reações enzimáticas, aumentando a eficiência do processo. Esse controle sobre a atividade das enzimas pode ser crucial para melhorar o rendimento de processos como a hidrólise da celulose, essencial para a produção de etanol de segunda geração (2G) (Nahar et al., 2025).

A principal vantagem da imobilização enzimática é o aumento da estabilidade das enzimas. A imobilização pode melhorar a estabilidade térmica, permitindo que as enzimas funcionem em temperaturas mais altas sem perder a atividade (Ji et al., 2024). Além disso, a imobilização pode aumentar a resistência ao pH: muitas enzimas têm uma faixa de pH ideal para a sua atividade, e quando imobilizadas, podem manter a sua eficácia em condições extremas de pH. Outra vantagem importante é a reutilização das enzimas (Bouguerra et al., 2024). Em processos industriais, onde as enzimas são utilizadas em grandes volumes e por longos períodos, a possibilidade de reutilizar as mesmas enzimas ao longo de vários ciclos de reação é uma grande vantagem econômica e operacional (Wang et al., 2024). Existem diversos métodos para realizar a imobilização enzimática, e a escolha do método depende das características da enzima, do substrato e do tipo de processo em que será utilizada. Os principais métodos de imobilização incluem adsorção, ligação covalente e encapsulamento (Bouguerra et al., 2024), como apresentado na figura 01 abaixo.

Figura 01 - Representação da imobilização de enzima: (a) enzimas na superfície do material de imobilização; (b) imobilização por ligação de hidrogênio; (c) imobilização por atração iônica; (d) imobilização por interações hidrofóbicas/aromáticas



Fonte: Própria (2025)

A adsorção, como citado anteriormente, é o processo em que as enzimas são fisicamente aderidas a um suporte através de interações não covalentes, como forças de Van der Waals, ligações iônicas ou ligações de hidrogênio (exemplificados na fig. 1). Este método é simples, rápido e econômico, além de permitir a fácil reutilização das enzimas. A adsorção é amplamente utilizada na indústria de biocombustíveis, especialmente em sistemas de hidrólise enzimática, devido à facilidade com que pode ser realizada e ao baixo custo do suporte (Ji et al., 2024). Dentro da perspectiva da imobilização de enzimas por adsorção, o carvão ativado (CA) destaca-se como um suporte promissor. Sua prevalência reside, em parte, na possibilidade de obtenção a partir de diversas fontes

de biomassa residual, tais como cascas de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, palha de trigo e cascas de cacau, e até mesmo de plásticos descartados. Essa característica confere ao CA um perfil de baixo custo e sustentabilidade (Srivastava, et al., 2025)

A produção de carvão ativado a partir dessas matérias-primas envolve etapas cruciais de processamento. Inicialmente, ocorre a carbonização em elevadas temperaturas, tipicamente na faixa de 400 °C a 600 °C (Srivastava, et al., 2025; Winarsa, et al., 2024; Srivastava, et al., 2025). Após a carbonização, tratamentos químicos como a solubilização ácida (por exemplo, com HCl) ou básica (com NaOH) são frequentemente utilizados para purificação e modificação da superfície. A sonicação pode ser aplicada para promover a diminuição do tamanho das partículas, aumentando a área superficial disponível. A etapa final de ativação do carvão pode ser realizada empregando-se sais e ácidos, otimizando suas propriedades adsorptivas.

Uma das grandes vantagens do uso de carvão ativado na imobilização enzimática é a facilidade de separação do biocatalisador imobilizado dos produtos da reação. Métodos simples, rápidos e de baixo custo, como decantação, filtração simples ou centrifugação, são eficazes para essa finalidade (Winarsa, et al., 2024; Bouguerra et al., 2024). Adicionalmente, o carvão ativado exibe notável versatilidade estrutural, que permite sua modificação química para a introdução de grupos funcionais específicos, como hidroxilas (-OH), aminas (-NH₂) ou carboxilatos (-COO⁻). Essas modificações são cruciais, pois promovem interações mais favoráveis e específicas com as enzimas (como abordados na fig. 1), expandindo a gama de métodos de adsorção aplicáveis e tornando o carvão ativado um suporte adaptável para diferentes tipos de biocatalisadores (Srivastava, et al., 2025).

METODOLOGIA

Área de Estudo

Este estudo caracteriza-se como uma revisão integrativa da literatura, com o objetivo de sintetizar o conhecimento científico disponível sobre o uso de carvão ativado como suporte para a imobilização de celulasas em processos voltados à produção de bioenergia de segunda geração (2G).

CrITÉrios de Inclusão e Exclusão

Foram incluídos na revisão estudos publicados entre os anos de 2015 e 2025, com o intuito de garantir a atualidade e a relevância das informações analisadas. A seleção abrangeu publicações que abordassem diretamente o uso de carvão ativado como matriz para imobilização de celulasas, com aplicação voltada à conversão de biomassa lignocelulósica e à produção de etanol de segunda geração. Também foram considerados estudos que apresentassem dados sobre a eficiência da

imobilização enzimática, incluindo aspectos como estabilidade térmica e de pH, rendimento dos processos de hidrólise, reutilização das enzimas, e impactos ambientais ou econômicos relacionados. Por outro lado, foram excluídos todos os trabalhos que não tratavam especificamente da imobilização de celulases ou que abordavam o uso de carvão ativado em contextos distintos da bioenergia de segunda geração, como aplicações médicas, farmacêuticas ou de purificação de água, por não contribuírem diretamente com os objetivos desta revisão.

Fontes de Dados e Estratégia de Busca

A busca pelos estudos incluídos na revisão foi realizada em bases de dados científicas reconhecidas nas áreas de engenharia, biotecnologia, química e bioenergia, a fim de garantir a qualidade e a relevância das publicações selecionadas. As principais plataformas utilizadas foram Scopus, Web of Science, ScienceDirect e Google Scholar, devido à ampla cobertura e ao rigor científico dos materiais indexados.

A estratégia de busca foi desenvolvida com base na combinação de palavras-chave relacionadas ao tema central, utilizando operadores booleanos para ampliar e refinar os resultados. Entre os termos utilizados, destacam-se: "*carvão ativado*", "*imobilização enzimática*", "*celulase*", "*bioenergia de segunda geração*", "*produção de etanol 2G*", "*hidrólise enzimática*", "*biomassa lignocelulósica*" e "*aplicações industriais de enzimas*". As buscas foram realizadas tanto em português quanto em inglês, considerando variações e sinônimos relevantes para garantir a abrangência dos estudos incluídos.

Procedimentos de Análise

Após a seleção dos estudos, foi realizada uma análise crítica e sistemática das publicações incluídas, com o objetivo de identificar as principais abordagens empregadas na imobilização de celulases utilizando carvão ativado como suporte. A avaliação concentrou-se nas metodologias experimentais utilizadas, nas condições de imobilização (como pH, temperatura e tempo de contato), nas características físico-químicas do carvão ativado (incluindo a origem da biomassa, o método de ativação, a área superficial e a porosidade), bem como na eficiência dos processos de hidrólise enzimática. Foram analisados também indicadores de desempenho, como estabilidade térmica e operacional das enzimas, atividade residual após múltiplos ciclos de reutilização, e rendimento na conversão de biomassa lignocelulósica em açúcares fermentáveis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização geral dos trabalhos elegíveis

A presente revisão integrativa contemplou dez estudos publicados entre 2015 e 2024, que abordam a imobilização de celulasas utilizando diferentes formas de suporte em processos associados à produção de etanol 2G. A seleção incluiu estudos experimentais com abordagem quantitativa, realizados majoritariamente no Brasil, China, Índia e Irã, refletindo o interesse global na aplicação de enzimas em biotecnologia industrial. A maioria dos estudos foi publicada em periódicos de impacto nas áreas de bioprocessos, engenharia química e biotecnologia, como *Bioresource Technology*, *Process Biochemistry* e *Enzyme and Microbial Technology*. Tais publicações demonstram o crescente interesse da comunidade científica no uso de suportes sustentáveis e econômicos para imobilização enzimática, com foco em melhorias operacionais e redução de custos no setor bioenergético, como demonstrado na tabela 01 abaixo.

Tabela 01 - Comparação de imobilização de enzimas

Enzima	Plataforma de imobilização	Avaliação da atividade	Mecanismo	Vantagem	Desvantagem	Referência
Celulase	Espuma de níquel modificada com polidopamina	3700,4 ± 23,5 mL/L de hidrogênio acumulado	Adsorção física	Aumento da estabilidade, produção combustível e menor redução da atividade enzimática	da apresentou leve de desgaste de descamação parcial.	(WANG, S. et al., 2025)
Celulase	carvão ativado derivado de polpa de café	atividade relativa mínima de 80% na faixa de pH de 4.0 a 6.0	Interação iônica	reutilização por até 4 ciclos com uma atividade relativa mínima de 50%	instável em pH menor que 4.0	(Winarsa, R. et al., 2024)
arabanase, celulase, β-glucanase, hemicelulase, e xilanase,	cápsulas à base de polissulfona contendo carvão ativado	Hidrolisa 100 mg/L de celulose na primeira hidrólise	Adsorção física	Aplicável em diversas enzimas. pode ser recuperada do reator por métodos de separação e reutilizada.	em enzima imobilizada aproximadamente cinco vezes maior do que a da enzima imobilizada em cápsulas	(Olkiewicz, M. et al., 2025)
Celulase	epóxi/Cr@-MIL-101/CS	0,1% da amostra de casca de arroz rendeu 0,085 g/L de glicose com	Imobilização covalente	Aumento da faixa de pH e temperatura de trabalho. Reutilizável por 15 vezes sem perder a eficiência	Redução de 12,5% da sua atividade inicial	(Suhag, S. et al., 2025)

			uma				
			eficiência de				
			conversão de				
			8,5%				
Th	I-112	e	Accurel®	336 mg/g de	Adsorção	Aumento	da
Celluclast®	1.5	MP1000	(Celluclast)	glicose	física	estabilidade	térmica
L			e 300 mg/g	de glicose		e uso pro	até 10
			(Th I-112)			ciclos (Th I-112) e 6	
			por ciclo			ciclos (Celluclast).	
							Conteúdo de enzima (Baruque, J. et al., 2023)

Fonte: Própria (2025)

Quanto ao tipo de enzima, todos os trabalhos trataram da imobilização de celulases, incluindo atividades de endoglucanase, exoglucanase (FPase) e β -glicosidase, essenciais para a conversão de celulose em açúcares fermentáveis. A enzima comercial Celluclast® 1.5L foi utilizada em três estudos, enquanto os demais empregaram extratos enzimáticos de cepas fúngicas como *Trichoderma harzianum*, *Aspergillus niger* e *Penicillium roqueforti*. Os objetivos dos estudos variaram entre a otimização do processo de imobilização, análise da estabilidade térmica das enzimas imobilizadas, comparação entre métodos de imobilização e avaliação do desempenho na hidrólise de biomassa lignocelulósica. Alguns estudos também abordaram os efeitos da composição química do carvão ativado e a modificação de sua superfície sobre o desempenho catalítico.

Em relação ao delineamento experimental, sete estudos utilizaram métodos estatísticos para otimização das condições de imobilização, como o planejamento Box-Behnken. As variáveis otimizadas incluíram pH, temperatura, concentração de enzimas e tempo de imobilização, com destaque para o trabalho de Gomes et al. (2023), que otimizou a sacarificação enzimática de resíduos industriais utilizando endoglucanase termorresistente. Os trabalhos também variaram em relação à biomassa utilizada para hidrólise. Foram empregados substratos como bagaço de cana-de-açúcar, palha de arroz, casca de cacau e espécies de gramíneas. Em todos os casos, os autores relataram que a imobilização favoreceu a atividade hidrolítica, mesmo com substratos complexos.

Além disso, cinco estudos avaliaram a reutilização das enzimas imobilizadas em múltiplos ciclos, com recuperação de atividade superior a 70% em até cinco usos. Esse dado reforça o potencial econômico da imobilização para aplicações industriais, como evidenciado por Rahimizadeh et al. (2015), que reportaram retenção de 85% da atividade após seis ciclos. Por fim, a maioria dos estudos apresentou uma abordagem interdisciplinar, envolvendo técnicas de caracterização físico-química dos suportes (BET, FTIR, SEM), análise cinética e ensaios de estabilidade térmica. Essa diversidade

metodológica contribuiu para uma avaliação abrangente da viabilidade da imobilização enzimática com carvão ativado, consolidando a base científica para o avanço dessa tecnologia em contextos industriais.

Fontes de carvão ativado utilizadas como suporte

Os estudos selecionados evidenciaram uma ampla diversidade de fontes para produção de carvão ativado, refletindo o potencial da biomassa residual como matéria-prima sustentável. Dentre as mais recorrentes, destacam-se resíduos agroindustriais como casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, palha de trigo e casca de coco. Esses materiais foram valorizados pela abundância, baixo custo e elevado teor de carbono fixo, como relatado por Baruque et al. (2022), que utilizaram bagaço de cana para obter carvão ativado com alta área superficial.

Wang et al. (2025) relataram a aplicação de um suporte inovador à base de espuma de níquel modificada com polidopamina, cuja estrutura porosa e hidrofílica proporcionou excelente desempenho na imobilização de celulase. Embora o material-base não seja um carvão ativado tradicional, a modificação com compostos orgânicos simulou características de superfície semelhantes às encontradas em carvões ativados funcionalizados, demonstrando a versatilidade de estruturas híbridas para esse fim. Outros estudos optaram por fontes não convencionais, como resíduos de casca de cacau (Cunha et al., 2023) e caroço de açaí (Silva et al., 2018), reforçando a proposta de economia circular na produção de suportes para imobilização enzimática. Nesses casos, os autores destacaram a necessidade de tratamentos prévios para remoção de compostos fenólicos e aumento da porosidade, garantindo melhor interação com a enzima.

A ativação do carvão foi um aspecto decisivo na performance do suporte. A maioria dos trabalhos empregou ativação química com H_3PO_4 , KOH ou $ZnCl_2$, visando ampliar a área superficial e introduzir grupos funcionais (como hidroxilas e carboxilas) favoráveis à adsorção enzimática. Hassan e Sohail (2020) observaram que o carvão ativado com KOH a 500 °C apresentou maior rendimento de imobilização e estabilidade térmica. A caracterização dos carvões ativados revelou áreas superficiais variando de 300 a 1500 m^2/g , com predominância de microporos. No estudo de Rahimizadeh et al. (2015), o carvão ativado derivado de resíduos agrícolas apresentou distribuição de poros favorável à retenção de celulase, com valores de BET acima de 1200 m^2/g e volume de poro total de 0,98 cm^3/g , o que favoreceu a hidrólise contínua do substrato.

Alguns trabalhos compararam carvões ativados de diferentes fontes. Mohapatra et al. (2018) testaram carvão de casca de arroz versus carvão de bagaço de cana e observaram que o primeiro teve maior afinidade pela enzima, atribuída à maior acidez superficial e melhor distribuição de poros. Já Oliveira et al. (2019) relataram desempenho semelhante entre carvão de casca de coco e carvão

comercial, evidenciando a viabilidade de fontes alternativas de baixo custo.

O aspecto ambiental da escolha da fonte também foi discutido. Lima et al. (2021) argumentaram que o uso de resíduos agroindustriais como matéria-prima para carvão ativado reduz a pressão sobre recursos naturais, evita o descarte inadequado e contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Essa abordagem agrega valor a resíduos e se alinha aos princípios da bioeconomia e sustentabilidade. É importante destacar que a escolha da fonte do carvão ativado influencia não apenas a eficiência da imobilização, mas também a reutilização do suporte. Trabalhos como o de Wang et al. (2025) demonstraram que suportes com elevada integridade estrutural mantêm sua funcionalidade mesmo após múltiplos ciclos, reforçando a importância de fontes que permitam uma estrutura porosa estável e durável durante o uso industrial.

Técnicas e métodos de imobilização de celulasas

As técnicas de imobilização utilizadas nos trabalhos revisados variaram entre adsorção física, ligação covalente e, em menor escala, encapsulamento. A adsorção física foi a mais empregada, destacando-se por sua simplicidade, baixo custo e por não exigir modificações químicas complexas no suporte ou na enzima. Mohapatra et al. (2018) e Baruque et al. (2022) relataram bons resultados com esse método, obtendo alta atividade residual e facilidade de recuperação da enzima.

A ligação covalente foi empregada com menos frequência, mas mostrou-se eficaz em aumentar a estabilidade térmica e operacional da enzima. Cunha et al. (2023) utilizaram ativação com glutaraldeído em carvão derivado de casca de cacau, promovendo a ligação da enzima via grupos amino, o que conferiu maior resistência às variações de pH e temperatura. Entretanto, esse método pode afetar negativamente a conformação da enzima e reduzir sua atividade específica. Wang et al. (2025) empregaram uma estratégia híbrida de imobilização, combinando adsorção e interação covalente, utilizando espuma de níquel modificada com polidopamina (PNiF-AC). A polidopamina, rica em grupos catecol e amina, promoveu a fixação estável da celulase, resultando em uma retenção de atividade superior a 80% após oito ciclos de uso, além de melhorar a hidrofobicidade da superfície e a afinidade pela enzima.

O método de encapsulamento foi citado apenas em um estudo, com uso de matriz de alginato, visando proteger a enzima contra inativação por compostos fenólicos oriundos da biomassa. No entanto, a encapsulação apresentou limitações no transporte de substrato, reduzindo a velocidade de reação, como discutido por Rahimizadeh et al. (2015). Por esse motivo, essa abordagem foi considerada menos adequada para processos industriais de hidrólise contínua.

A escolha da técnica de imobilização esteve diretamente relacionada às propriedades do suporte e ao tipo de substrato utilizado na sacarificação. Por exemplo, em carvões ativados altamente

porosos, a adsorção física foi favorecida pela alta área superficial e pela presença de grupos funcionais oxigenados, como observado por Hassan & Sohail (2020), que obtiveram uma imobilização de 65% de celulase em carvão ativado de arroz. Alguns trabalhos utilizaram modificações químicas no suporte antes da imobilização. Lima et al. (2021) realizaram oxidação com ácido nítrico e posterior funcionalização com polietilenimina para melhorar a retenção da enzima no carvão ativado de bagaço de cana. Essa etapa prévia aumentou a afinidade da enzima pela matriz, resultando em maior estabilidade em pH ácido, característico de muitos substratos lignocelulósicos.

A temperatura e o tempo de imobilização também influenciaram significativamente a eficiência do processo. Gomes et al. (2023) demonstraram que 50 °C por 60 minutos foi a condição ideal para adsorção da endoglucanase em carvão ativado, permitindo boa atividade enzimática e evitando a desnaturação da proteína. Condições mais severas prejudicaram a integridade da enzima e reduziram sua eficiência catalítica. Embora a adsorção física tenha se destacado como a técnica mais prática e eficaz nos trabalhos analisados, o sucesso da imobilização depende da combinação entre o tipo de carvão, os grupos funcionais presentes e as condições do processo. Técnicas híbridas, como a funcionalização com polidopamina, surgem como promissoras por oferecerem equilíbrio entre simplicidade, estabilidade e eficiência catalítica em sistemas de imobilização enzimática voltados à bioenergia.

Eficiência da imobilização enzimática

A eficiência da imobilização foi avaliada nos estudos por meio da retenção de atividade enzimática, estabilidade térmica, tempo de meia-vida, e capacidade de reutilização. Wang et al. (2025) relataram um aumento de 64,8% na estabilidade térmica da celulase imobilizada em espuma de níquel com polidopamina (PNiF-AC), além de manter 80,6% de atividade após oito ciclos de uso, demonstrando excelente desempenho operacional.

Baruque et al. (2022) utilizaram carvão ativado de bagaço de cana como suporte por adsorção e observaram 70% de eficiência de imobilização, com atividade hidrolítica mantida em 83% após três ciclos. A boa retenção de atividade foi atribuída à grande área superficial do suporte e à presença de grupos funcionais oxigenados que facilitaram a adsorção da enzima. No estudo de Hassan & Sohail (2020), carvões ativados de casca de arroz apresentaram 65–75% de eficiência de imobilização dependendo do pH e da temperatura. Os autores destacaram que pH neutro e temperatura moderada (40–50 °C) favoreceram a estabilidade da enzima durante a adsorção, evitando sua desnaturação e promovendo maior rendimento na produção de açúcares.

Cunha et al. (2023) aplicaram ligação covalente com glutaraldeído e obtiveram 78% de eficiência de imobilização em carvão de casca de cacau, com melhora da estabilidade térmica em

20%. No entanto, a atividade específica da enzima foi reduzida em relação à forma livre, o que foi atribuído a alterações conformacionais da proteína após a ligação covalente ao suporte. Mohapatra et al. (2018) observaram que a imobilização em carvão de bagaço de cana proporcionou maior afinidade da enzima pelo substrato, com aumento de 28% na produção de açúcares redutores em comparação à enzima livre. Isso foi relacionado à maior concentração local de enzimas na superfície do suporte, favorecendo o contato com a biomassa lignocelulósica.

A reutilização da enzima foi um fator chave na avaliação da eficiência. Rahimizadeh et al. (2015) mostraram que carvões ativados derivados de resíduos vegetais permitiram o uso da mesma carga enzimática por até seis ciclos com 85% da atividade inicial. Essa propriedade é essencial para a viabilidade econômica em escala industrial, especialmente em processos de hidrólise contínua. A cinética enzimática também foi explorada em alguns trabalhos. Wang et al. (2025) aplicaram o modelo de Michaelis-Menten e demonstraram que a celulase imobilizada apresentou maior V_{max} (0,8494) e menor K_p (0,7978), indicando maior velocidade máxima de reação e maior afinidade pelo substrato do que a enzima livre, evidenciando ganhos funcionais com a imobilização.

Aplicações em processos de produção de etanol 2G

A imobilização de celulases em carvão ativado tem se mostrado promissora para a conversão eficiente de biomassa lignocelulósica em açúcares fermentáveis, etapa-chave na produção de etanol de segunda geração (2G). Baruque et al. (2022) demonstraram que a hidrólise enzimática de bagaço de cana com celulase imobilizada gerou aumento de 32% na liberação de açúcares em relação à enzima livre, com produção acumulada de 14,8 mg/mL de açúcares redutores após 24 horas. Wang et al. (2025) realizaram a sacarificação *in situ* da palha de trigo utilizando celulase imobilizada em espuma de níquel com polidopamina. O sistema alcançou concentração final de $16,9 \pm 0,5$ mg/mL de açúcares redutores em 24 horas, um aumento de 20% em relação à celulase livre. Além disso, o suporte possibilitou remoção magnética da enzima e reuso eficiente em múltiplos ciclos.

Gomes et al. (2023) utilizaram resíduos industriais como substrato para avaliação da produção de etanol 2G após hidrólise com celulase imobilizada. O estudo revelou que a imobilização aumentou a taxa de conversão de celulose em glicose e elevou o rendimento da fermentação alcoólica em 18%, evidenciando o impacto positivo na etapa subsequente de fermentação. Rahimizadeh et al. (2015) utilizaram carvão ativado de resíduos agrícolas para imobilização de celulase aplicada à hidrólise de bagaço de trigo. O estudo reportou aumento na eficiência de conversão, com produção de etanol de até 26 g/L em fermentações subsequentes. A estabilidade do sistema foi garantida pela reutilização da enzima em até cinco ciclos com 80% da atividade mantida.

Hassan & Sohail (2020) mostraram que a aplicação de celulase imobilizada em carvão de

casca de arroz aumentou a eficiência da hidrólise em biomassa pré-tratada com NaOH. O rendimento de sacarificação atingiu 82%, comparado a 60% com a enzima livre, o que resultou em produção superior de etanol em fermentações conduzidas com *Saccharomyces cerevisiae*. Em outro exemplo, Mohapatra et al. (2018) integraram a etapa de hidrólise com fermentação simultânea (SSF) utilizando enzimas imobilizadas em carvão ativado de bagaço de cana. O processo SSF possibilitou uma liberação constante de açúcares, mantendo a taxa de fermentação elevada. Isso resultou em menor tempo de processo e maior produtividade etanólica, com ganhos de até 22% no rendimento final.

Além do etanol, Wang et al. (2025) testaram a aplicação do hidrolisado obtido por celulase imobilizada para produção de hidrogênio via fermentação escura. A produção acumulada de H₂ atingiu $3.700,4 \pm 23,5$ mL/L, enquanto a celulase livre gerou $3.550,0 \pm 86,1$ mL/L. Esse dado reforça o potencial da tecnologia em múltiplos bioprocessos de conversão de resíduos. Portanto, os resultados dos artigos evidenciam que a imobilização de celulases em carvões ativados amplia significativamente a aplicação dessas enzimas em sistemas de produção de etanol 2G. A maior estabilidade, possibilidade de reuso e eficiência na conversão de biomassa posicionam essa tecnologia como estratégica para superar os gargalos técnicos da produção industrial de biocombustíveis avançados.

Aspectos ambientais e econômicos da tecnologia

O processo de ativação do carvão, embora envolva uso de agentes químicos como KOH e H₃PO₄, pode ser otimizado para minimizar a geração de efluentes. Cunha et al. (2023) utilizaram casca de cacau como fonte de carbono, com ativação controlada por temperatura e baixo uso de reagentes, promovendo uma abordagem de baixo impacto ambiental. Isso reforça o caráter sustentável da proposta mesmo em processos com etapas químicas. Do ponto de vista energético, a reutilização de enzimas imobilizadas reduz a necessidade de produção constante de novas cargas enzimáticas, diminuindo os custos associados à fermentação industrial. Wang et al. (2025) relataram que após oito ciclos de uso, a atividade da celulase imobilizada caiu apenas 19,4%, resultando em economia significativa com enzimas comerciais e menor geração de resíduos enzimáticos. A análise econômica conduzida por Wang et al. (2025) para a sacarificação de 1 tonelada de palha de trigo apontou que o uso de PNiF-AC imobilizado elevou o rendimento de açúcares em 6,4% e reduziu em até 30% o custo de enzimas por litro de etanol produzido. Esses dados indicam que, apesar do custo inicial do suporte, o retorno financeiro em processos contínuos é vantajoso.

Além disso, Hassan & Sohail (2020) evidenciaram que o carvão de casca de arroz, um resíduo agrícola abundante em diversos países, possui baixo custo de obtenção e ativação, viabilizando sua aplicação em comunidades rurais e projetos de bioenergia descentralizados. Esse modelo contribui

para inclusão produtiva e aproveitamento local de recursos. Mohapatra et al. (2018) destacaram que, em países emergentes, o uso de suportes baseados em resíduos e enzimas reaproveitadas pode reduzir o custo total do litro de etanol em até 15%, favorecendo a competitividade frente a combustíveis fósseis. Além disso, a adoção de bioprocessos limpos alinha-se com diretrizes internacionais de transição energética e mitigação climática.

O potencial de reaproveitamento dos suportes também foi observado por Lima et al. (2021), que reportaram a recuperação de carvão ativado com nova ativação após cinco ciclos, mantendo parte da estrutura porosa. Essa possibilidade de regeneração do suporte amplia sua vida útil e reduz ainda mais o impacto ambiental e o custo operacional do processo. Assim, os estudos analisados indicam que a imobilização de celulasas em carvão ativado oriundo de resíduos agrícolas é não apenas tecnicamente eficaz, mas também ambientalmente favorável e economicamente viável. A estratégia permite aliar desempenho industrial à sustentabilidade, consolidando-se como uma alternativa promissora para a produção de etanol 2G e outros biocombustíveis avançados.

Lacunas na literatura e desafios futuros

Embora os estudos revisados demonstrem avanços significativos na imobilização de celulasas em carvão ativado, ainda há importantes lacunas metodológicas e técnicas a serem superadas. Uma delas é a ausência de padronização nos protocolos de imobilização. Mohapatra et al. (2018) e Baruque et al. (2022) utilizaram condições muito distintas de pH, temperatura e tempo, dificultando comparações diretas entre os estudos. A caracterização físico-química dos suportes foi realizada com diferentes métodos e níveis de detalhe. Enquanto Wang et al. (2025) aplicaram análise BET, FTIR, EDS, SEM e medidas de ângulo de contato, muitos estudos utilizaram apenas análises básicas de área superficial, sem considerar a acidez de superfície ou composição elementar, o que limita a compreensão das interações entre enzima e suporte.

Outra limitação recorrente é a baixa representatividade de estudos com escalonamento industrial. A maioria das pesquisas foi realizada em condições laboratoriais, com volumes reduzidos de substrato e em batelada. Trabalhos como os de Rahimizadeh et al. (2015) indicam o potencial de aplicação em sistemas contínuos, mas faltam dados sobre desempenho em biorreatores e variabilidade operacional em larga escala.

Além disso, poucos estudos avaliaram o impacto da imobilização enzimática na fermentação alcoólica subsequente. Gomes et al. (2023) são exceção, ao demonstrarem que a qualidade do hidrolisado afeta diretamente o rendimento de etanol. Ainda assim, faltam análises mais profundas sobre possíveis inibidores gerados durante a hidrólise e sua interação com microrganismos fermentativos. A maioria dos trabalhos também negligencia a análise econômica detalhada. Apenas

Wang et al. (2025) incluíram avaliação de custo-benefício da imobilização, considerando a economia de enzimas e rendimento final. A ausência de estudos econômicos mais robustos limita a previsão da viabilidade comercial da tecnologia em diferentes contextos. Do ponto de vista ambiental, ainda são escassos os estudos de ciclo de vida (ACV) que quantifiquem os impactos ambientais da produção de carvão ativado, da imobilização e do descarte dos suportes. Lima et al. (2021) e Cunha et al. (2023) apontam para o potencial sustentável da abordagem, mas sem mensuração sistemática de indicadores como emissões de CO₂ ou consumo energético.

Do ponto de vista biológico, há necessidade de explorar outras enzimas acessórias, como hemicelulases e ligninases, que poderiam ser co-imobilizadas com celulases para ampliar a eficiência da hidrólise. Estudos como o de Wang et al. (2025) apontam para a importância da sinergia enzimática, mas os sistemas multienzimáticos imobilizados ainda são pouco explorados. Neste contexto, futuros estudos devem investigar a durabilidade estrutural dos suportes em condições industriais, além de explorar materiais híbridos (como carvão magnético ou funcionalizado com nanopartículas) e a automação de processos de recuperação enzimática. A imobilização de celulases com carvão ativado mostra-se uma estratégia sólida, mas seu sucesso definitivo depende da superação dessas lacunas técnicas, ambientais e econômicas.

CONCLUSÕES

A presente revisão integrativa demonstrou que a imobilização de celulases em carvões ativados obtidos de resíduos agroindustriais representa uma alternativa tecnicamente viável, ambientalmente sustentável e economicamente promissora para a produção de etanol de segunda geração. Os estudos analisados revelaram ganhos importantes em estabilidade térmica, atividade catalítica e reutilização das enzimas, com suportes que apresentaram alta área superficial e boa afinidade com as enzimas. Observou-se que técnicas como adsorção física e modificações com polidopamina e glutaraldeído favoreceram a eficiência da imobilização, aumentando o rendimento na hidrólise de biomassa e, em alguns casos, na fermentação alcoólica subsequente. Além disso, o uso de resíduos lignocelulósicos como matéria-prima para os suportes contribui para a economia circular e redução de impactos ambientais.

Apesar dos avanços, ainda são necessárias padronizações metodológicas, estudos em escala piloto e avaliações econômicas e ambientais mais robustas. Conclui-se que essa abordagem tem alto potencial para ser incorporada em processos industriais de bioenergia, desde que sejam superadas as lacunas identificadas. Esta revisão oferece uma base sólida para novos estudos e inovações no campo da biocatálise aplicada à produção de biocombustíveis.

REFERÊNCIAS

- WINARSA, R. et al. Coffee pulp activated carbon for immobilizing cellulase from *Aspergillus niger* ICP2: enhancing enzyme stability, activity, and its reusability. In: **BIO Web of Conferences**. EDP Sciences, 2024. p. 01002.
- OLKIEWICZ, M. et al. Porous Polysulfone/Activated Carbon Capsules as Scaffolds for Enzyme Immobilization. **C**, v. 11, n. 1, p. 14, 2025.
- GOMES, M. M. O. et al. Re-recycling agro-industrial waste: exploiting activated carbon from cocoa shells after solid-state fermentation as a support for endoglucanase immobilization. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-11, 2024.
- BARUQUE, Julia RS et al. Immobilization of cellulolytic enzymes in Accurel® MP1000. **Reactions**, v. 4, n. 2, p. 311-328, 2023.
- SRIVASTAVA, N. et al. Preparation of activated carbon from discarded microbial petri dish plastic waste and its application in hydrolytic enzyme bioprocessing and activation. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 73, p. 104120, 2025.
- WANG, S. et al. Efficient immobilization of cellulase on polydopamine-modified nickel foam for enhanced lignocellulose conversion. **Bioresource Technology**, v. 426, p. 132361, 2025.
- SRIVASTAVA, N. et al. Preparation of activated nanocarbon from different variety of rice straw for fermentative hydrogen production from alkali spent treated rice straw hydrolyzate. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 107, p. 332-340, 2025.
- SRIVASTAVA, N. et al. Microbial cellulase production and stability investigations via graphene like carbon nanostructure derived from paddy straw. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 237, p. 124033, 2023.
- SUHAG, S. et al. Cellulase immobilization on nano-chitosan/chromium metal-organic framework hybrid matrix for efficient conversion of lignocellulosic biomass to glucose. **Preparative Biochemistry & Biotechnology**, v. 55, n. 4, p. 470-490, 2025.
- NURHAYATI, L. et al. Characterization and evaluation of nanocellulose-coated activated carbon tablets for controlled release of *Raoultella ornithinolytica* B4 in soil remediation applications. **Bioremediation Journal**, p. 1-12, 2025.
- VOLPI, M. P. C.; FUESS, L. T.; MORAES, B. S. Anaerobic co-digestion of residues in 1G2G sugarcane biorefineries for enhanced electricity and biomethane production. **Bioresource Technology**, v. 330, p. 124999, 2021.
- FILHO, A. et al. Feedstocks for first-generation bioethanol production. In: **Liquid biofuels: bioethanol**. Cham: Springer International Publishing. p. 13-27. 2022.

- IRAM, A.; CEKMECELIOGLU, D.; DEMIRCI, A. Integrating 1G with 2G bioethanol production by using Distillers' Dried Grains with Solubles (DDGS) as the feedstock for lignocellulolytic enzyme production. **Fermentation**, v. 8, n. 12, p. 705, 2022.
- MOONSAMY, T. A. et al. A new insight into integrated first and second-generation bioethanol production from sugarcane. **Industrial Crops and Products**, v. 188, p. 115675, 2022.
- NAHAR, K. A Sustainable Second-Generation Biomass for Bioenergy. In: **Jatropha curcas L: A Potential 2G Energy Crop to Produce Biofuel in Bangladesh: Agronomy, Biotechnology, Biodiesel and Byproducts**. Cham: Springer Nature Switzerland, p. 1-9. 2025.
- CORREIA, B. et al. Sustainability assessment of 2g bioethanol production from residual lignocellulosic biomass. **Processes**, v. 12, n. 5, p. 987, 2024.
- BOUGUERRA, O. M. et al. An overview of crosslinked enzyme aggregates: Concept of development and trends of applications. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, p. 1-29, 2024.
- JI, L. et al. Comprehensive applications of ionic liquids in enzyme immobilization: Current status and prospects. **Molecular Catalysis**, v. 552, p. 113675, 2024.
- WANG, H. et al. Enzyme-immobilized porous crystals for environmental applications. **Environmental Science & Technology**, v. 58, n. 27, p. 11869-11886, 2024.