

Protocolos em Química



POR PET-QUÍMICA IQ/UNB

Revista científica editorada pelos estudantes dos cursos do Instituto de Química da Universidade de Brasília com o objetivo de divulgar textos de pesquisa, de ensino, artigos de revisão e os chamados QuiArtigos, que são artigos escritos exclusivamente por estudantes de graduação.



**Vol. 3
Nº. 4**

3 de novembro de 2025
<https://protocolosemquimica.com/>



SUMÁRIO

Sobre o projeto.....	03
Editoração.....	04
Seção Pesquisa:	
Avaliação da correção de counterpoise em dímero de HCl.....	07
Seção Revisão:	
Bioengenharia: Microalgas como fonte de biodiesel.....	14
Cascas de café e cacau como fontes de energia e fertilizantes, por meio de pirólise lenta.....	19
Produção de diesel verde em escala piloto derivado de microalgas.....	24
Uso de fibrina e agarose marinha para geração de tecidos.....	28
Do Campo à Inovação Verde - A Trajetória do LMCerva.....	32
Projetos LMCerva: Ciência em soluções concretas e de alto valor agregado.....	33
Análise sobre métodos de produção modernos para obtenção de cervejas sem álcool.....	43
A reutilização do bagaço de malte para geração de energia.....	48
Cerveja sem glúten: métodos de produção.....	57
Estratégias de produção de cervejas com baixo teor de carboidratos e aprovação diabética.....	62
Estudo do reaproveitamento do trup cervejeiro com perspectiva na economia circular.....	67
Extração de proteínas do bagaço do malte assistida por mecanoquímica.....	74
Valorização do bagaço de malte por conversão em biocarvão e aplicações na cadeia produtiva da cerveja.....	79



SOBRE O PROJETO

A Revista Protocolos em Química é um projeto desenvolvido pelo grupo PET-Química/IQ/UnB/MEC visando proporcionar aos seus PETianos, aos discentes do Instituto de Química da Universidade de Brasília e aos demais jovens pesquisadores de áreas correlatas, a inserção de resultados próprios de suas pesquisas em um periódico idiomaticamente acessível e gratuito. Assim, revisões, resenhas, resultados de pesquisas, de trabalhos de Iniciação Científica, de Técnicas de Pesquisa, entre outros trabalhos, podem ser divulgados neste periódico após revisão por pares.

Dessa forma, ela conta com quatro seções, sendo elas: seção pesquisa, seção artigos de revisão, seção ensino e seção QuiArtigo. Dessa forma, na primeira seção poderão ser submetidos trabalhos de pesquisa, inéditos ou não, que visam a divulgação e ampliação do conhecimento químico. A segunda seção é destinada àqueles que desejam apresentar um levantamento de informações a respeito de alguma temática relacionada à Química, analisando-a e discutindo os dados apresentados com uma visão crítica. Na terceira seção, poderão ser submetidos trabalhos de pesquisa na área de ensino de química em todos os níveis de ensino, que considerem a devida relação entre o referencial teórico, o método e a técnica de análise dos dados. Por fim, a quarta seção é exclusiva aos estudantes de graduação e pós-graduação em Química: a seção QuiArtigo. Inicialmente, o QuiArtigo era um trabalho apenas do PET-Química/UnB/MEC, onde cada membro do grupo escrevia uma resenha crítica descrevendo um tema de difícil entendimento por parte do grande público, de uma forma mais acessível sem perder o caráter acadêmico.

Porém, o projeto foi ressignificado para aceitar os trabalhos de outros discentes. Diante disto, sejam todos muito bem-vindos!



EDITORAÇÃO

Prof. Dr. Daví Aleksandro Cardoso Ferreira

Tutor do Grupo PET-Química/UnB, professor do Instituto de Química (IQ), pela Divisão de Físico-Química, na Universidade de Brasília (UnB) e idealizador da Revista Protocolos em Química

Atos de Jesus Silva

Estudante de Licenciatura em Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Anthony Monteiro

Estudante de Química Tecnológica na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Bruna Seguins

Estudante de Química Tecnológica na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Catarina Sampaio

Estudante de Bacharelado em Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Gabriel Castro

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.



Hellen Ferreira

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Iago Cezario

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Julia Ribeiro

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Larissa Cavalcante

Estudante de Licenciatura em Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Linara Tarusa

Estudante de Licenciatura em Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Lucas Matheus Viturino

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Luísa Fachinetto

Estudante de Licenciatura em Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Paulo Resende

Estudante de Química Tecnológica na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.



Pedro Henrique Carvalho

Estudante de Química Tecnológica na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.

Victoria Pires

Estudante de Engenharia Química na Universidade de Brasília (IQ/UnB) e membro do grupo PET-Química.



Avaliação da correção de counterpoise em dímero de HCl

DOI: 10.5281/zenodo.17503253

Isaac Oliveira Miranda Magalhaes,^a Luana Lemos Reis,^a Luiz Henrique Portela,^a Luyza Lorenna Lacerda Lopes^a e Joao Batista Lopes Martins^{a*}

Computational chemistry has been established as an essential tool to complement experimental studies, assisting in the interpretation of complex phenomena such as transition states, fluorescence, drug-protein interactions, and synthesis mechanisms. However, at the undergraduate level, this area is still often considered challenging to understand, mainly due to its strong connection with concepts of physical chemistry and quantum mechanics, which require a high level of fundamental equations, such as the Schrödinger equation. Given this, this work presents Density Functional Theory (DFT) calculations through two key points: basis sets and the exchange-correlation functional, exploring their relevance in computational chemistry.

A química computacional tem se consolidado como uma ferramenta essencial para complementar estudos experimentais, auxiliando na interpretação de fenômenos complexos, como estados de transição, fluorescência, interações fármaco-proteína e mecanismos de síntese. No entanto, em nível de graduação, essa área ainda é frequentemente vista como de difícil compreensão, principalmente por sua forte ligação com conceitos da físico-química e da mecânica quântica, que exigem o domínio de equações fundamentais, como a equação de Schrödinger. Diante disso, este trabalho apresenta o cálculo da teoria do funcional da densidade (do inglês *Density Functional Theory*, DFT) através de dois pontos importantes: as funções de base e o funcional de troca e correlação, explorando sua relevância na química computacional.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: lopes@unb.br.

Palavras-chave: (HCl)₂, BSSE, dímero, Counterpoise, DFT.

Recebido em 28 de agosto de 2025,

Aprovado em 17 de outubro de 2025,

Publicado em 03 de novembro de 2025.

Introdução

A Teoria do Funcional da Densidade (do inglês *Density Functional Theory*, DFT) oferece um equilíbrio entre precisão e custo computacional para cálculos de estrutura eletrônica, porém sua aplicabilidade depende criticamente da seleção de funcionais de troca e correlação (do inglês *Exchange and Correlation energy*, XC) e conjuntos de funções de base, conjuntos matemáticos empregados para descrever orbitais atômicos, dentro da aproximação LCAO (Combinação Linear de Orbitais Atômicos em Moleculares, do inglês *Linear Combination of Atomic Orbitals*). Essas escolhas introduzem erros sistemáticos, como o Erro de Superposição de Base (do inglês *Basis Set Superposition Error*, BSSE), que surge quando funções de base de fragmentos interagentes se sobrepõem artificialmente em sistemas não covalentemente ligados, superestimando energias de interação devido à descrição orbital assimétrica entre dímeros e monômeros. Complementarmente, o Erro de Incompletude da Função de Base (do inglês *Basis Set Incompleteness Error*, BSIE) decorre da truncagem da expansão orbital, comprometendo a convergência para o limite de base completa. Ambos os erros comprometem predições de energias de dissociação, propriedades termodinâmicas,

entre outras. Assim, a confiabilidade de cálculos DFT depende da combinação entre funcionais de densidade de troca e correlação (XC) e conjuntos de funções de base. Esta escolha irá ditar o custo computacional, que por sua vez depende do tamanho de átomos do sistema.

Erros como BSIE e BSSE resultam diretamente de aproximações teórico-computacionais. O BSIE reduz-se, em princípio, com a expansão da base.¹ Enquanto que, o BSSE em interações fracas pode ser corrigido pelo método de contrapeso (CP, do inglês *counterpoise*) de Boys e Bernardi.² A literatura apresenta uma intensa discussão sobre o método CP, mostrando que esta é apenas uma tentativa aproximada para remover o BSSE.³ Os parágrafos devem ser separados por um espaçamento, com exceção dos títulos e subtítulos com o primeiro parágrafo. Aqui deve ser introduzido o restante da introdução. Dessa forma, nessa parte do trabalho os autores devem contextualizar o tema escolhido de forma precisa e sucinta, e estabelecer um elo entre o que já foi publicado nesta mesma linha e o que se pretende publicar. Observe-se que a introdução deve ser motivante, para que o potencial leitor queira continuar lendo. Ela deve elucidar, de imediato, o que os autores do trabalho estão propondo e por que o estão

propondo, ou seja, devem indicar a importância por trás do trabalho.

A química teórica e computacional consolida-se como uma área estratégica na ciência moderna, integrando princípios de química, física, matemática e ciência da computação para prever estruturas, propriedades e comportamentos moleculares com precisão inatingível por métodos exclusivamente experimentais.⁴⁻¹² Devido a sua grande importância, a Organização das Nações Unidas (ONU) declarou o ano de 2025 como o Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quântica, pois em 1925 os cientistas alemães Werner Heisenberg, Max Born, e Pascual Jordan apresentavam a sua mecânica matricial, as bases da mecânica quântica, que veio revolucionar a humanidade.^{13,14} Logo depois, no início de 1926, foi trazida por Schrödinger a sua formulação da equação de ondas. Um tratamento didático para a evolução histórica da teoria quântica pode ser encontrada no livro de Canuto e colaboradores.⁷ Os avanços da teoria quântica ondulatória propiciaram métodos de estrutura eletrônica para descrever sistemas atômicos e moleculares, incluindo:

- Técnicas semi-empíricas, como os métodos derivados da aproximação NDDO (do inglês *Neglect of Diatomic Differential Overlap*) AM1, PM3, PM6 e PM7;
- *Ab initio* Hartree-Fock (RHF, ROHF e UHF);
- Pós-Hartree-Fock, como a teoria da Perturbação Møller-Plesset, MP_n, onde n é a ordem de perturbação, sendo mais comum o MP2. Outro método bastante usado, apesar de computacionalmente dispendioso, é o método CCSD (do inglês *Coupled Cluster Singles and Doubles*) com excitações simples e duplas;
- Teoria do Funcional da Densidade (DFT).

Métodos como Hartree-Fock, DFT, pós-Hartree-Fock (e.g., CCSD(T), MP2), Dinâmica Molecular e simulações de Monte Carlo permitem estudar desde sistemas moleculares complexos até fenômenos dinâmicos, como decaimentos radioativos e interações enzimáticas.⁴⁻¹² Avanços recentes, como métodos híbridos QM/MM (do inglês *Quantum Mechanics/Molecular Mechanics*) e algoritmos de *Machine Learning*, ampliaram aplicações em catálise, biotecnologia, ciência dos materiais e nanotecnologia, resolvendo problemas multiescala ainda intratáveis por métodos isolados de estrutura eletrônica devido ao número de átomos. Apesar de desafios persistentes, como custos elevados e limitações na descrição da correlação eletrônica, a evolução contínua de hardware e algoritmos reforça o papel indispensável desses métodos como pilares para inovação científica e tecnológica.⁷ Ainda que

frequentemente percebida como um domínio inacessível, repleto de abstrações matemáticas e requisitos computacionais proibitivos, ela é uma ferramenta essencial para investigar sistemas moleculares, complementando abordagens experimentais. Assim, a química teórica e computacional não apenas reproduz resultados experimentais, mas também permite explorar para além da previsão de sistemas químicos em nível molecular, fornecendo valiosas contribuições para o avanço do conhecimento científico.

Neste caso, foi investigada a dissociação do dímero de ácido clorídrico, $(\text{HCl})_2 \rightarrow 2\text{HCl}$, como sistema-modelo para estudos metodológicos de interações intermoleculares. Este complexo de interação de dipolo já foi amplamente estudado por diferentes métodos (DFT, HF e MP2), com energia de dissociação referencial em $-2,01 \text{ kcal.mol}^{-1}$, obtida experimentalmente.¹⁵⁻¹⁷ Sua simplicidade estrutural permite avaliar o desempenho de funcionais de densidade e conjuntos de base, enquanto que sua energia de dissociação experimental facilita a quantificação da acurácia dos cálculos. Neste contexto, espera-se com este trabalho facilitar o acesso a essa importante ferramenta teórica, avaliando esta reação sobre dois pontos de vista: a dependência da função de base e o funcional de troca e correlação.

Metodologia

O presente estudo foi desenvolvido a partir dos laboratórios da disciplina de Tópicos de Físico-Química, que visa estudar duas fontes de erro fundamentais na química computacional: BSSE e BSIE, principalmente para analisar como estes erros são dependentes dos funcionais elegidos. Na aproximação do método CP são utilizados centros atômicos fantasmas, nos quais são adicionadas as funções de base do átomo real, para equilibrar a descrição entre monômeros e dímeros.²⁰

A dissociação $(\text{HCl})_2 \rightarrow 2\text{HCl}$ foi analisada utilizando a DFT, consolidada desde os teoremas de Hohenberg e Kohn (1964), que depois foram escritas na forma das equações de Kohn-Sham, que permitiram o cálculo de um sistema como função da densidade eletrônica.^{18,19} A DFT é amplamente aplicada em estudos de estrutura eletrônica, eletronegatividade, potencial químico e reatividade molecular, entre outros.^{18,19} Esta ferramenta é particularmente eficaz para sistemas com muitos átomos, pois permite o cálculo com inclusão da energia de correlação com um baixo custo computacional, diferentemente dos métodos pós-HF que demandam alto recurso computacional. Ao mesmo tempo, funcionais DFT têm se mostrado bastante acurados, oferecendo

precisão química adequada. Os cálculos foram realizados no pacote Gaussian 16, empregando doze funcionais de densidade de troca e correlação DFT, categorizados em²⁰:

- Puros: BLYP^{21,22}, PBE²³;
- Híbridos: B3LYP²⁴, PBE0²⁵, B3PW91^{26,27}, TPSSh²⁸;
- Dispersão: B3LYP-D3²⁹, PBE-D3²⁹, B3LYP-D3BJ³⁰, PBE-D3BJ³⁰, ω B97XD³¹, M06-2X³².

Funcionais DFT implementam estratégias distintas para aproximar a energia de troca-correlação.³³ O BLYP, funcional puro da Aproximação de Gradiente Generalizado (GGA, do inglês *Generalized Gradient Approximation*) vem da combinação do funcional de troca de Becke com o funcional de correlação local e não local de Lee, Yang e Parr.^{21,22} Já o B3LYP é um funcional híbrido GGA que utiliza a expressão de correlação não local de Lee, Yang e Parr, o funcional VWN III de correlação local, e o funcional de troca exato de HF.²⁴ Enquanto que, o ω B97XD é um funcional híbrido de alcance separado (RSF, do inglês *Range Separated Functional*) com correção empírica intrínseca para dispersão (D).³¹

A correção de dispersão empírica de Grimme e suas variantes (D3 e D3BJ) adicionam termos de energia e gradientes analíticos que influenciam nas otimizações de geometria, particularmente no ajuste de distâncias interatômicas para sistemas com interações fracas, como ligações de hidrogênio ou interações π - π .^{29,30} A principal diferença entre as versões D3 padrão e D3BJ reside na função de amortecimento (do inglês *damping*) proposta por Becke e Johnson, que melhora a descrição em distâncias intermediárias e evita a superestimativa em distâncias curtas.³⁰ Adicionadas posteriormente à convergência do ciclo de autoconsistência (SCF, do inglês *Self-Consistent Field*) como termos empíricos nos funcionais B3LYP-D3, B3LYP-D3BJ, PBE-D3 e PBE-D3BJ, essas correções influenciam as geometrias via gradientes analíticos, mas não afetam a densidade eletrônica durante o ciclo SCF.^{29,30} Em contraste, a descrição da dispersão é incluída diretamente no funcional durante o SCF em ω B97XD e M06-2X por meio de termos intrínsecos, garantindo assim a autoconsistência entre a densidade eletrônica e a energia total.^{31,32}

Foi utilizada a família de funções de base denominadas de consistente-correlacionadas, desenvolvidas pelo grupo de Dunning.^{34,35} Trata-se do conjunto cc-pVXZ, adicionando funções difusas que geram a família aug-cc-pVXZ (X = D,T,Q,5,6,7). Este conjunto de funções de base foram

desenhadas para convergir cálculos pós-HF, com uma expansão progressiva de funções gaussianas, incluindo componentes difusas, convergindo para o limite da base completa. Foram usadas as funções aug-cc-pVXZ (X = D, T, Q, 5), onde:

- aug: Denota a inclusão de *funções difusas*, essenciais para descrever regiões distantes de núcleos em interações não covalentes.³⁶
- cc-pVXZ: Conjuntos correlacionados consistentes com funções de polarização. O índice X indica a ordem da qualidade na descrição dos orbitais³⁴:
 - D: duplo- ζ ;
 - T: triplo- ζ ;
 - Q: quadruplo- ζ ;
 - 5: quíntuplo- ζ .

Com a expansão hierárquica (D → T → Q → 5), espera-se melhorar a descrição da correlação eletrônica, reduzir o BSIE e convergir assintoticamente para o limite de base completa. Por outro lado, isto consequentemente gerará aumento progressivo do custo computacional. Dessa forma, essas bases permitem avaliar a convergência progressiva de propriedades eletrônicas com a expansão da base, a eficácia do método CP na correção BSSE em diferentes níveis de completude da função de base, bem como a influência de aproximações de troca-correlação no erro absoluto $|\epsilon|$ da energia de dissociação.

As geometrias foram fixadas em otimizações prévias com as combinações especificadas do banco de dados NCCE31/05 Non Covalent Complexation Energies³⁷. O comportamento dos funcionais, considerando o conjunto de funções de base aug-cc-pVXZ no dímero do HCl foi avaliado por meio do cálculo do erro relativo e do erro absoluto ($|\epsilon|$) para as energias de dissociação sem correção e com correção pelo método counterpoise, calculados como:

$$\Delta E_{\text{diss}} = 2E_{\text{HCl}} - E_{(\text{HCl})_2} \quad (1)$$

$$|\epsilon| = |\Delta E_{\text{calc}} - \Delta E_{\text{ref}}| \quad (2)$$

$$E_{\text{rel}} = \frac{|\epsilon|}{\Delta E_{\text{ref}}} \quad (3)$$

em que $E_{(\text{HCl})_2}$ se refere à energia total do dímero (sistema associado) em seu estado fundamental, obtida via cálculo DFT com funcional e base específicos. E_{HCl} é a energia total de um monômero HCl isolado (congelado na geometria do dímero),

calculada com o mesmo funcional/base, sem interações com o fragmento vizinho. ΔE_{diss} é a energia necessária para dissociar o dímero em dois monômeros isolados, em que valores positivos indicam reação endotérmica (dímero estável) e valores negativos indicam reação exotérmica (dímero instável). Da mesma forma, ΔE_{calc} se refere ao valor calculado de ΔE_{diss} com funcional/base específicos. ΔE_{ref} é o valor de referência para a energia de dissociação, obtido da base de dados NCCE31. $|\epsilon|$ é a magnitude do desvio absoluto entre o valor calculado e a referência, medindo a acurácia do método, e E_{rel} é o erro normalizado pelo valor de referência.

A correção de *counterpoise* (CP) é definida como:

$$E_{CP} = 2E_{HCl} - |E_{HCl}^{\text{dímero}} + E_{HCl}^{\text{dímero}}|$$

em que E_{HCl} se refere à energia total do monômero do HCl, calculado com a função de base do monômero e com a geometria do monômero no dímero otimizado. Este é um caso particular em que os dois monômeros são iguais. Caso fossem diferentes, esse primeiro termo seria a soma de cada monômero. Neste caso, o mais correto seria colocarmos a escrita como E_{HCl}^{HCl} , para enfatizarmos que trata-se da função de base do monômero, mas para simplificação escrevemos apenas o E_{HCl} . Diferentemente, $E_{HCl}^{\text{dímero}}$ é a energia de cada um dos monômeros do HCl isolados com a função de base do dímero.

O cálculo é realizado colocando os átomos do primeiro monômero e apenas as posições atômicas do segundo monômero (átomos fantasmas) na mesma geometria do dímero. Assim, o cálculo é feito com o conjunto de base completo do dímero. O mesmo é feito para o segundo monômero, lembrando que neste caso os dois monômeros são praticamente idênticos na geometria. Então, E_{CP} é a correção da energia de dissociação para remover o BSSE, que é superestimado. Então a relação com a energia de dissociação corrigida é dada por:

$$\Delta E_{diss,CP} = 2E_{HCl}^{\text{dímero}} - E_{(HCl)_2}$$

em que $E_{(HCl)_2}$ se refere à energia total do dímero $(HCl)_2$ calculada com seu próprio conjunto de base completo e corresponde à energia eletrônica do sistema associado no arranjo geométrico otimizado.

O BSIE foi avaliado pela convergência de ΔE_{diss} com a expansão da base. Embora eficaz em bases pequenas, o *counterpoise* não elimina o BSIE inerente aos cálculos individuais, pois trata apenas da superposição entre fragmentos, e não da limitação intrínseca da base usada, e pode subestimar energias de interação em conjuntos muito

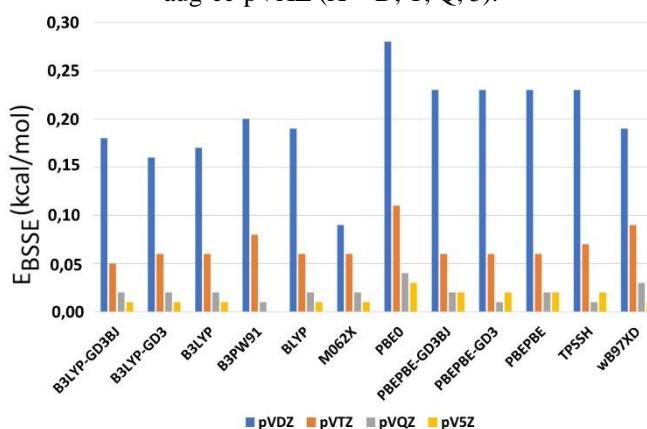
limitados.¹ Em princípio, em bases bem balanceadas, à medida que a base se expande, valores corrigidos e não corrigidos convergem, reduzindo a necessidade do uso de CP. O fenômeno de compensação de erro ocorre quando o BSSE, que superestima, e o BSIE, que subestima a interação, acabam parcialmente cancelando-se. Nesses casos, a energia “não corrigida” pode estar mais perto do valor real do que a corrigida por CP.³

Resultados e discussão

As energias de dissociação sem correção estão relacionadas ao erro BSIE e as energias corrigidas com *counterpoise* estão associadas ao erro BSSE. Neste estudo, devido ao reduzido número de átomos, foi adotada a correção de *counterpoise* concomitante com a otimização de geometria. Em geral, o custo computacional é reduzido com o cálculo da otimização de geometria separada do cálculo da correção CP, o qual é feito em uma etapa somente de cálculo de energia (*single-point*).

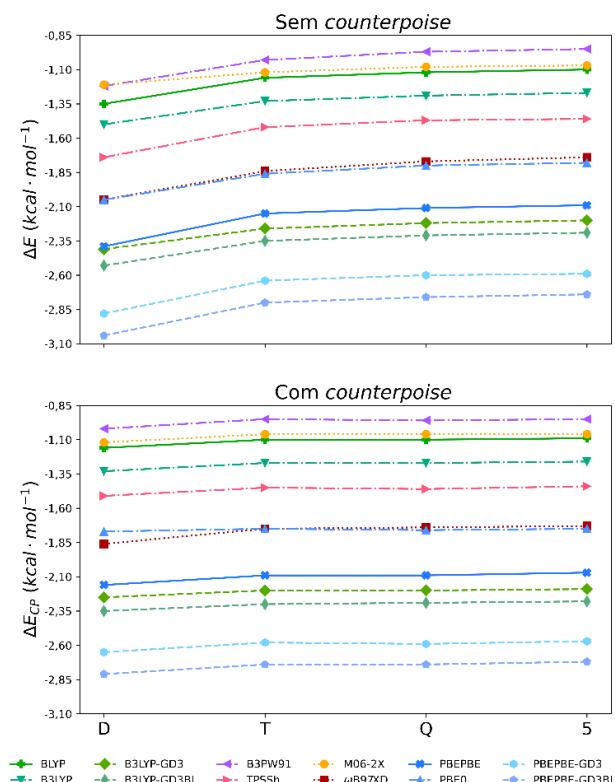
O Gráfico 1 apresenta a energia BSSE, diferença de energia entre o cálculo da estrutura corrigida com *counterpoise* menos a energia da estrutura sem a correção *countepoise*, para os funcionais utilizados com o conjunto de funções de base aug-cc-pVXZ (X = D,T,Q,5). Todos os funcionais apresentaram o mesmo comportamento, de diminuição do erro BSSE com o aumento da função de base. Podemos observar que a função de base aug-cc-pVDZ é a que apresenta maior correção de *counterpoise*, este comportamento é esperado, por ser a base de menor tamanho (duplo- ζ) da família de funções de base usada. Por outro lado, as funções aug-cc-pVQZ e aug-cc-pV5Z apresentaram erro BSSE próximos a zero, o que poderia sugerir que para estas funções de base, não seria necessário aplicar o método CP, ou que a contribuição é quase desprezível. Mas há que se levar em conta, que o caso estudado, o dímero do HCl, representa um sistema reduzido em número de átomos e que com o aumento do número de átomos, o erro BSSE torna-se significativo mesmo para estas outras funções de base.

Gráfico 1. Energia BSSE em função do conjunto de base aug-cc-pVXZ (X = D, T, Q, 5).



Outro resultado importante é com relação ao funcional M06-2X. Este é o único funcional da série estudada que apresenta erros BSSE inferiores a $0,1 \text{ kcal.mol}^{-1}$, mesmo na função de base aug-cc-pVDZ. O Gráfico 2 apresenta dois gráficos comparativos da variação da energia de dissociação com correção (Gráfico 2.a) e sem correção (Gráfico 2.b), associados ao uso do conjunto de funções de base aug-cc-pVXZ (X = D, T, Q, 5) da família de Dunning.

Gráfico 2. Variação da energia de dissociação ΔE_{diss} em kcal.mol^{-1} do dímero de HCl em função do conjunto de base aug-cc-pVXZ (X = D, T, Q, 5) para os doze funcionais.



Observa-se que, tanto para a energia de dissociação corrigida quanto para a não corrigida, a função duplo- ζ apresentou valor de energia de dissociação com maior erro com relação às demais funções de base. Este resultado está em linha com o pouco uso da função aug-cc-pVDZ na literatura. As demais funções de base apresentam baixa variação da energia de dissociação, de aug-cc-pVTZ para aug-cc-pV5Z, para os funcionais em estudo. Ademais, todos os funcionais se comportaram como o esperado ao convergirem assintoticamente, sendo que apenas três funcionais convergiram para a energia de dissociação experimental de $-2,01 \text{ kcal.mol}^{-1}$: PBEPBE, PBE0 e ω B97XD.

A Tabela 1 apresenta os resultados do erro absoluto $|\epsilon|$ para os funcionais utilizados, bem como os valores dos coeficientes de correlação r e de determinação R^2 . Foi realizada a extrapolação para uma função de base aug-cc-pV6Z (6 ζ) e os valores são apresentados.

Ao analisar o erro absoluto das energias sem correção (Tabela 1), os funcionais B3PW91, M06-2X, BLYP, B3LYP, TPSSH, ω B97XD e PBE0 apresentaram aumento do erro ao melhorar o conjunto de base, indicando maior sensibilidade ao uso do conjunto de base incompleto. Ao incluir correções de dispersão D3 e D3BJ aos funcionais B3LYP e PBEPBE, o erro é reduzido em relação aos seus funcionais correspondentes sem correção. Isso ocorre devido a influência direta dessas correções na densidade eletrônica e na otimização da geometria.

Tabela 1. Erro absoluto $|\epsilon|$ em kcal.mol⁻¹. Coeficiente de correlação r , Coeficiente de determinação R^2 e extração da energia de dissociação para a função aug-cc-pV6Z.

	D	T	Q	5	6	r	R^2	
B3LYP	0,68	0,74	0,74	0,75	1,23	0,85	0,72	
	D3BJ	0,34	0,29	0,28	0,27	2,25	-0,91	0,83
	D3	0,24	0,19	0,19	0,18	2,17	-0,86	0,74
PBE	0,15	0,08	0,08	0,06	2,04	-0,88	0,78	
	D3BJ	0,8	0,73	0,73	0,71	2,69	-0,88	0,78
		0,64	0,57	0,58	0,56	2,54	-0,83	0,68
B3PW91	0,99	1,06	1,05	1,06	0,92	0,77	0,59	
BLYP	0,85	0,91	0,91	0,92	1,06	0,85	0,72	
M06-2X	0,89	0,95	0,95	0,95	1,03	0,77	0,60	
PBE0	0,24	0,26	0,25	0,26	1,75	0,67	0,45	
TPSSH	0,5	0,56	0,55	0,57	1,42	0,83	0,69	
ω B97XD	0,15	0,26	0,27	0,28	1,67	0,85	0,73	

Além disso, todos os funcionais tiveram coeficientes de correlação para a variação do erro absoluto com o tamanho da base acima de 0,77, com destaque para o M06-2X e o ω B97XD (0,93 e 0,92, respectivamente), com exceção para o PBE0. Ao realizar a extração para a função de base aug-cc-pV6Z, três funcionais chegaram mais próximo ao valor experimental da energia de dissociação: B3LYP-D3BJ (-2,18 kcal.mol⁻¹), B3LYP-D3 (-2,11 kcal.mol⁻¹) e PBEPBE (-1,95 kcal.mol⁻¹).

Com as energias corrigidas pelo método CP, o erro apresenta menor variação com o aumento do tamanho do conjunto de base a partir da tripla- ζ , aug-cc-pVTZ, até a quíntuplo ζ , aug-cc-pV5Z.

Os funcionais PBE0, PBEPBE, e B3LYP-D3 apresentam valores constantes de BSSE. Assim como no BSIE, os funcionais B3PW91, M06-2X e BLYP apresentaram os maiores valores de BSSE e sem variações significativas com o uso de conjunto de bases maiores. Já os funcionais PBEPBE, PBE0 e B3LYP-D3 mantiveram os menores valores de erro absoluto. O acréscimo de correções de dispersão D3 e D3BJ reduzem o erro com o aumento do tamanho do conjunto de bases (de aug-cc-pVDZ até aug-cc-pV5Z). Esse comportamento era esperado uma vez que tanto o PBEPBE quanto o BLYP apresentam grande subestimação da dispersão. Desse modo, os funcionais PBEPBE, PBEPBE-D3, PBEPBE-

D3BJ, B3LYP-D3, B3LYO-D3BJ tem o erro reduzido com o uso de bases maiores.

Ademais, ao analisar a Tabela 1, tem-se que o B3LYP-D3BJ foi o funcional que apresentou o melhor coeficiente de correlação de -0,91, indicando menor oscilação do erro absoluto à medida que se melhora o conjunto de base. Ao extrapolar a função de base para aug-cc-pV6Z, o funcional PBE teve o melhor comportamento ao apresentar a energia de dissociação igual a -2,04 kcal.mol⁻¹.

Conclusões

Este estudo investigou as energias de dissociação do dímero (HCl)₂, com ênfase na avaliação e correção dos Erros de Superposição (BSSE) e Incompletude (BSIE) da Base por meio do método counterpoise. Os resultados demonstram que a expansão do conjunto de base além de aug-cc-pVTZ produz valores convergentes e consistentes. A inclusão das correções de dispersão de Grimme (D3 e D3BJ) aprimorou significativamente a precisão dos funcionais testados. Dentre estes, B3LYP-D3, B3LYP-D3BJ e PBE0 destacaram-se, exibindo os menores erros absolutos e os maiores coeficientes de correlação e determinação (r e R^2). Ademais, observou-se uma convergência assintótica do BSSE com o aumento sistemático do conjunto de base para todos os funcionais avaliados.

Contribuições por Autor

Todos os autores tiveram a mesma contribuição.

Conflito de interesse

Os autores declaram que não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, FAPDF, CAPES e UnB.

Referências

- 1 C. D. Sherrill, B. G. Sumpter, M. O. Sinnokrot, M. S. Marshall e E. G. Hohenstein, *J. Phys. Chem. A*, 1999, **103**, 8625–8633.
- 2 S. F. Boys e F. Bernardi, *Mol. Phys.*, 1970, **19**, 553–566.
- 3 F. B. van Duijneveldt, J. G. C. M. van Duijneveldt-van de Rijdt e J. H. van Lenthe, *Chem. Rev.*, 1994, **94**, 1873–1885.

- 4 J.-L. Lions e P. G. Ciarlet, Computational Chemistry, *Gulf Professional Publishing*, 1990.
- 5 A. A. Ribeiro e I. M. Greca, *Quim. Nova*, 2003, **26**, 542–549.
- 6 J. Schrier, Introduction to Computational Physical Chemistry, *University Science Books*, 2017.
- 7 J. D. M. Vianna, A. Fazzio e S. Canuto, Teoria Quântica de Moléculas e Sólidos: Simulação Computacional, *LF Editorial*, 2004.
- 8 N. H. Morgan e K. Coutinho, Métodos de Química Teórica e Modelagem Molecular, *Livraria da Física*, 2007.
- 9 A. Szabo e N. S. Ostlund, Modern Quantum Chemistry: Introduction to Advanced Electronic Structure Theory, *Dover Publications*, 1996.
- 10 W. J. Hehre, L. Radom, P. v. R. Schleyer e J. A. Pople, Ab Initio Molecular Orbital Theory, *Wiley-Interscience*, 1986.
- 11 F. Jensen, Introduction to Computational Chemistry, *Wiley*, **3**, 2017.
- 12 T. Helgaker, P. Jorgensen e J. Olsen, Molecular Electronic-Structure Theory, *Wiley*, 2000.
- 13 Nature Editorial, *Nature*, 2025, **7**.
- 14 United Nations General Assembly, International Year of Quantum Science and Technology, 2025. Resolution A/RES/78/287, United Nations General Assembly resolution adopted 7 June 2024, Available via UN Digital Library, 2024.
- 15 G. A. Blake, K. L. Busarow, R. C. Cohen, K. B. Laughlin, Y. T. Lee e R. J. Saykally, *The Journal of Chemical Physics*, 1988, **89**, 6577–6587.
- 16 K. N. Rankin e R. J. Boyd, *Journal of Computational Chemistry*, 2001, **22**, 1590–1597.
- 17 R. C. Guedes, P. C. do Couto e B. J. Costa Cabral, *The Journal of Chemical Physics*, 2003, **118**, 1272–1281.
- 18 P. Hohenberg e W. Kohn, *Phys. Rev.*, 1964, **136**, B864–B871.
- 19 W. Kohn e L. J. Sham, *Phys. Rev.*, 1965, **140**, A1133–A1138.
- 20 Gaussian Inc., Gaussian 16, Revision C.01, Developers: M. J. Frisch, G. W. Trucks, et al., Wallingford, CT, 2016.
- 21 A. D. Becke, *Phys. Rev. A*, 1988, **38**, 3098–3100.
- 22 C. Lee, W. Yang e R. G. Parr, *Phys. Rev. B*, 1988, **37**, 785–789.
- 23 J. P. Perdew, K. Burke e M. Ernzerhof, *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**, 3865–3868.
- 24 P. J. Stephens, F. J. Devlin, C. F. Chabalowski e M. J. Frisch, *J. Phys. Chem.*, 1994, **98**, 11623–11627.
- 25 C. Adamo e V. Barone, *J. Chem. Phys.*, 1999, **110**, 6158–6170.
- 26 A. D. Becke, *J. Chem. Phys.*, 1993, **98**, 5648–5652.
- 27 J. P. Perdew e Y. Wang, *Phys. Rev. B*, 1992, **45**, 13244–13249.
- 28 J. Tao, J. P. Perdew, V. N. Staroverov e G. E. Scuseria, *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**, 146401.
- 29 S. Grimme, J. Antony, S. Ehrlich e H. Krieg, *J. Chem. Phys.*, 2010, **132**, 154104.
- 30 S. Grimme, S. Ehrlich e L. Goerigk, *J. Comput. Chem.*, 2011, **32**, 1456–1465.
- 31 J.-D. Chai e M. Head-Gordon, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2008, **10**, 6615–6620.
- 32 Y. Zhao e D. G. Truhlar, *Theor. Chem. Acc.*, 2008, **120**, 215–241.
- 33 A. D. Becke, *J. Chem. Phys.*, 2014, **140**, 18A301.
- 34 T. H. Dunning, Jr., *J. Chem. Phys.*, 1989, **90**, 1007–1023.
- 35 R. A. Kendall, T. H. Dunning, Jr. e R. J. Harrison, *J. Chem. Phys.*, 1992, **96**, 6796–6806.
- 36 E. Papajak, J. Zheng, H. R. Leverentz e D. G. Truhlar, *J. Chem. Theory Comput.*, 2011, **7**, 3027–3034.
- 37 Y. Zhao e D. G. Truhlar, *J. Phys. Chem. A*, 2005, **109**, 5656–5667.

Bioengenharia: Microalgas como fonte de biodiesel

DOI: 10.5281/zenodo.17508328

Victor Porto Caetano^{a*}

Microalgae are a promising alternative for sustainable biofuel and bioproduct production. This study analyzes two complementary approaches: genetic engineering to enhance lipid and starch production in the extremophile microalga *Chlamydomonas pacifica*, and the isolation and cultivation of the native Brazilian strain *Desmodesmus abundans*. The first approach demonstrated high tolerance to extreme conditions and significant metabolic production, enabling biodiesel and thermoplastic polyurethane synthesis. The second showed that environmental stresses, such as nitrogen limitation and bicarbonate addition, increase biomass and carbohydrate accumulation. Results highlight the potential of advanced biotechnologies and the value of national biodiversity for energy applications. Together, these strategies underscore microalgae as a key resource in transitioning to a cleaner, more efficient energy matrix with lower environmental impact, without directly competing with food production.

As microalgas emergem como alternativa promissora para a produção sustentável de biocombustíveis e bioproductos. Este trabalho analisa dois estudos: um que emprega engenharia genética para aumentar lipídios e amido na microalga extremófila *Chlamydomonas pacifica*, e outro focado no isolamento e cultivo da cepa nativa brasileira *Desmodesmus abundans*. A primeira abordagem demonstrou alta tolerância a condições extremas e aumento expressivo na produção metabólica, viabilizando biodiesel e poliuretano termoplástico. A segunda evidenciou que estresses ambientais, como limitação de nitrogênio e adição de bicarbonato, elevam biomassa e carboidratos. Os resultados ressaltam o potencial das biotecnologias avançadas e a importância da biodiversidade nacional para aplicações energéticas. Essas estratégias reforçam o papel das microalgas na transição para uma matriz energética mais limpa, eficiente e de menor impacto ambiental, sem competir diretamente com a produção de alimentos.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: victorpc703@gmail.com

Palavras-chave: Biodiesel; microalgas.

Recebido em 05 de agosto de 2025,

Aprovado em 20 de setembro de 2025,

Publicado em 03 de novembro de 2025.

Introdução

A transição energética é uma temática bastante relevante no século XXI. Atualmente, cientistas de diversas áreas estão em busca de novas alternativas para a produção de energia de formas mais sustentáveis e eficientes, a fim de evitar crises climáticas, econômicas, energéticas e sociais, as quais ameaçam a existência da vida na Terra no futuro próximo. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), os combustíveis fósseis atenderam aproximadamente 80% da demanda energética global em 2023.¹ No Brasil, embora as fontes renováveis representem uma parcela significativa da matriz energética, o setor de transportes ainda depende majoritariamente de combustíveis de origem fóssil.

Nesse contexto, a produção de biocombustíveis, sobretudo o etanol e o biodiesel, desponta como uma alternativa importante. Todavia, as culturas agrícolas, principais fontes desses biocombustíveis atualmente, apresentam diversas problemáticas no cenário nacional, tais como: devastação de fauna e flora nativas para o cultivo, uso intensivo de agrotóxicos, dependência de combustíveis fósseis

para a operação de maquinário e, a principal entre todas, a disputa de terras entre a produção de alimentos e a de combustíveis.^{2,3,4,5} Diante desse dilema, surge uma questão crucial: o que é mais importante para a sociedade, produzir alimentos ou energia?

Como resposta a esse impasse, estudos recentes têm apontado para o uso de microalgas (organismos microscópicos, geralmente unicelulares, que vivem em ambientes aquáticos e são fotossintéticos) como uma solução promissora no cenário da transição energética. Diferentemente das culturas agrícolas convencionais, as microalgas não competem com a produção de alimentos, podem ser cultivadas em ambientes controlados e apresentam alta produtividade de biomassa e lipídios, insumos essenciais para a síntese de biocombustíveis.^{6,7}

Estima-se que algumas espécies de microalgas possam produzir até 30 vezes mais óleo por hectare do que culturas tradicionais, como soja e canola, além de se desenvolverem em ambientes inóspitos à agricultura convencional, como águas residuais e regiões semiáridas.^{8,9}

É importante destacar que, apesar de frequentemente considerados uma alternativa ambientalmente mais sustentável, os biocombustíveis também apresentam impactos negativos. Assim como os combustíveis fósseis, esses compostos liberam substâncias poluentes, como compostos de carbono, enxofre e outros elementos nocivos à atmosfera. Além disso, seu uso e descarte inadequados podem gerar toxicidade em ecossistemas aquáticos, afetando a biodiversidade local.¹⁰

No entanto, uma vantagem significativa dos biocombustíveis em relação aos derivados do petróleo é o fato de utilizarem carbono já presente no ciclo natural do carbono, o que pode contribuir para a redução do acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera, mitigando, assim, os efeitos das mudanças climáticas.¹¹

O estudo de Gupta *et al.* explora a engenharia da microalga extremófila *Chlamydomonas pacifica* para aumentar a produção de lipídios e amido, visando o desenvolvimento de cepas comercialmente relevantes. Por sua vez, a pesquisa de Silva *et al.* investiga a morfologia, filogenia molecular e avaliação de biomassa de *Desmodesmus abundans* no Brasil, fornecendo dados essenciais para o aproveitamento dessa espécie na produção de biocombustíveis.^{6,7}

Metodologia

O estudo conduzido por Gupta *et al.* seguiu uma abordagem experimental aplicada, com foco na engenharia genética e avaliação de desempenho de uma microalga extremófila, *Chlamydomonas pacifica*, visando aumentar a produção de lipídios e amido para fins biotecnológicos. A pesquisa abrangeu desde a modificação genética laboratorial até testes em escala piloto.

Inicialmente, os autores utilizaram técnicas de mutagênese por radiação ultravioleta (UV) e cruzamento para desenvolver cepas da microalga *Chlamydomonas pacifica* com maior tolerância à luz intensa e ao pH elevado. Após a seleção dos mutantes mais tolerantes, as linhagens foram submetidas à engenharia genética, com introdução de dois genes: (i) o gene *Dof*, um fator de transcrição derivado da soja (*Glycine max*) para aumento da produção lipídica, e (ii) o gene *PGM1*, de *Chlamydomonas reinhardtii*, associado à síntese de amido. As transformações genéticas foram realizadas por eletroporação, com verificação da integração gênica via *colony-PCR*, técnica de biologia molecular utilizada para verificar rapidamente se uma colônia de microrganismos transformados contém o DNA desejado, e quantificação de expressão por RT-qPCR (Reação

em Cadeia da Polimerase com Transcrição Reversa e Quantificação em Tempo Real).

A eficácia das modificações foi avaliada com base no crescimento celular, fluorescência de clorofila e produção de biomassa. Para medir a produção lipídica, os pesquisadores utilizaram corantes *Nile Red* e citometria de fluxo (técnica laboratorial usada para analisar características físicas e químicas de células ou partículas em suspensão), complementados por microscopia confocal. A produção de amido foi avaliada por coloração com solução de Lugol e quantificação por métodos colorimétricos. Posteriormente, os experimentos foram escalonados para cultivo em tanques abertos do tipo *raceway* (80 L) em estufa com controle de temperatura e pH. Os dados de crescimento foram monitorados ao longo de três ciclos produtivos. A biomassa obtida foi processada para extração de lipídios e amido, seguida pela conversão dos lipídios em biodiesel via saponificação direta e esterificação.

O artigo de produção nacional, realizado por Burgel *et al.*, teve como objetivo isolar, identificar e avaliar o potencial biotecnológico de uma nova cepa de microalga, a *Desmodesmus abundans* LGMM0013, coletada no reservatório do Iraí, no estado do Paraná. A metodologia combinou técnicas morfológicas, moleculares e bioquímicas para caracterização da cepa e quantificação de biomassa, carboidratos e lipídios.

A amostra foi isolada a partir de coleta direta no reservatório e cultivada inicialmente em meio autotrófico CHU, meio nutritivo desenvolvido por Chu (1942), muito utilizado no cultivo de algas. Ele contém sais minerais essenciais que as algas precisam para crescer e não possui fonte de carbono orgânico, ou seja, o carbono vem exclusivamente do CO₂ dissolvido no meio, sob condições controladas (21 °C, fotoperíodo 12h luz/12h escuro, e iluminação de 7,4 μmol m⁻²s⁻¹). As colônias isoladas foram mantidas em cultura líquida com aeração contínua (0,4% de CO₂). A cepa de crescimento mais rápido foi selecionada para análises posteriores.

A avaliação da produção de biomassa, carboidratos e lipídios foi realizada por meio de comparação com a cepa padrão *Tetradesmus obliquus* (LGMM0001), mantida no NPDEAS (UFPR). Ambas as cepas foram cultivadas sob as mesmas condições em frascos Erlenmeyer de 2 L com meio CHU. A cinética de crescimento foi monitorada a cada 48 horas durante 22 dias, com quantificação de biomassa seca por

método gravimétrico, utilizando microfiltros de fibra de vidro (0,7 µm) previamente secos e pesados.

A quantificação de carboidratos seguiu o método colorimétrico de Dubois *et al.*, com fenol e ácido sulfúrico. Amostras da biomassa liofilizada foram tratadas e analisadas por espectrofotometria a 490 nm. A extração e quantificação dos lipídios totais foram realizadas com base no método de Bligh e Dyer, com modificações: a biomassa foi tratada com solução de clorofórmio/metanol (1:2 v/v), submetida a ultrassom e posterior extração da fase orgânica. Os lipídios foram então quantificados por pesagem após evaporação do solvente.

Adicionalmente, foi conduzido um experimento com variação da composição do meio de cultivo, testando diferentes concentrações de nitrogênio (NaNO_3) e fontes de carbono (NaHCO_3), em condições autotróficas e mixotróficas. Os efeitos dessas variações foram avaliados quanto à produção de biomassa, lipídios e carboidratos, após 16 dias de cultivo.

A identificação taxonômica da cepa foi realizada por meio de análises morfológicas (microscopia óptica e eletrônica de varredura) e filogenéticas. Para a análise molecular, foi extraído o DNA genômico e amplificada a região SIT (Spacer Interno Transcrito) do rDNA com primers específicos. As sequências obtidas foram comparadas com bancos de dados (*GenBank*) e utilizadas para construir árvores filogenéticas por inferência bayesiana e máxima verossimilhança, a fim de confirmar a identidade da cepa como *Desmodesmus abundans*. Todos os experimentos foram realizados em triplicata, e os dados foram analisados estatisticamente por ANOVA (Análise de Variância), teste estatístico usado para verificar se existem diferenças significativas entre três ou mais grupos de dados, adotando nível de significância de $p < 0,05$.

Resultados e discussão

Em primeira análise, Gupta *et al.* desenvolveram uma abordagem completa de engenharia genética e cultivo em escala piloto da microalga extremófila *Chlamydomonas pacifica*, visando a produção aumentada de lipídios e amido. A cepa, naturalmente tolerante a pH elevado, salinidade e temperatura, foi submetida a mutagênese UV e cruzamentos seletivos, resultando em uma linhagem com tolerância aprimorada a alta intensidade luminosa ($> 2000 \text{ E/m}^2/\text{s}$), o dobro da tolerância da cepa selvagem. Essa linhagem também manteve crescimento robusto em pH 10,25. Embora uma segunda rodada de mutagênese não tenha melhorado ainda

mais a tolerância ao pH, a resistência a condições extremas foi mantida estável por mais de um ano.⁶

Para incremento da produtividade metabólica, os autores expressaram dois genes-alvo distintos. A introdução de um fator de transcrição *Dof* derivado da soja promoveu aumento significativo da acumulação intracelular de lipídios, conforme indicado por citometria de fluxo e microscopia confocal com coloração por *Nile Red*. Em meio nitrogenado, 29,8% da população apresentava alto conteúdo lipídico, enquanto sob depleção de nitrogênio essa proporção atingiu 47,1%, comparada a 24,1% na cepa controle. Para o acúmulo de amido, foi utilizado o gene *PGM1* de *Chlamydomonas reinhardtii*, resultando em aumento de 15,5 vezes na expressão relativa e em incremento de 30% na absorbância da coloração por Lugol, sugerindo maior acúmulo intracelular.⁶

As cepas evoluídas, evoluída+*Dof* e evoluída+*PGM1*, foram cultivadas em tanques abertos de 80 L, em três rodadas consecutivas. Todas demonstraram crescimento fototrófico estável, com produtividade máxima de até 3,9 g/m²/dia, exceto a linhagem *PGM1*, que teve falha inicial atribuída à contaminação do inóculo, mas que se recuperou posteriormente. A análise gravimétrica confirmou aumento de 28% no conteúdo lipídico na cepa *Dof* (37 g/100 g de biomassa seca) e de 27% no teor de amido na cepa *PGM1* (45,8 g/100 g de biomassa seca), em relação à linhagem controle.⁶

A biomassa das linhagens transgênicas foi convertida com sucesso em dois bioproductos: biodiesel e poliuretano termoplástico (TPU). O biodiesel foi produzido por saponificação direta seguida de esterificação, com rendimento de 3–12% da biomassa seca inicial e pureza superior a 80%, conforme análise por cromatografia em camada fina (TLC) e cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas (GC-MS). O principal componente foi hexadecanoato de metila (C16:0), representando 42–48% do total.⁶

O TPU, denominado A2141, foi sintetizado a partir de poliol e diisocianato derivados da biomassa e apresentou propriedades mecânicas compatíveis com aplicações comerciais, como dureza Shore A de 75 ± 3 , resistência à tração de 3,22 MPa e alongamento de 282%. Quando aplicado como revestimento sobre tecido de algodão, aumentou em 12 vezes a rigidez flexural e apresentou ângulo de contato de 97,99°, demonstrando hidrofobicidade.⁶

Os autores destacam o potencial de *C. pacifica* como plataforma industrial robusta e geneticamente manipulável,

com vantagens sobre cepas-modelo para cultivo ao ar livre. Recomendam, contudo, a realização de avaliações tecnoeconômicas (TEA), análise do ciclo de vida (LCA), testes de conversão lipídica em combustível sustentável de aviação (SAF) e métodos de extração integrados para múltiplos biocomponentes. Além disso, sugerem considerar aspectos sazonais, biossegurança de linhagens recombinantes e cultivo rotativo com outras espécies. Tais resultados posicionam *C. pacifica* como candidata promissora na produção de biocombustíveis e biomateriais em escala comercial.⁶

Já Burgel *et al.* teve como objetivo isolar e caracterizar uma nova cepa de microalga verde, coletada na Represa do Iraí (Paraná, Brasil), denominada *Desmodesmus abundans* LGMM0013, avaliando sua morfologia, identidade molecular e capacidade biotecnológica para produção de biomassa, carboidratos e lipídios. A cepa LGMM0013 foi identificada como *D. abundans* por meio de análises morfológicas (microscopia óptica e eletrônica de varredura) e moleculares, com sequenciamento da região SIT do DNA ribossomal. A árvore filogenética mostrou alta proximidade entre a cepa estudada e outras cepas de *D. abundans* e *D. spinosus*, confirmando a identificação.⁷

Em cultivo autotrófico por 22 dias, *D. abundans* LGMM0013 atingiu 1500 mg L⁻¹ de biomassa seca, superando em 50% a produção da cepa controle *Tetradesmus obliquus* LGMM0001, utilizada em fotobioreatores pela UFPR. A produção de carboidratos foi de 673,39 mg L⁻¹, um aumento de 130% em relação à cepa controle (292,16 mg L⁻¹), enquanto a produção de lipídios foi semelhante entre as duas cepas, com *D. abundans* atingindo 259,7 mg L⁻¹.⁷

Em experimentos adicionais com diferentes composições de meio de cultivo, verificou-se que a privação de nitrogênio (redução de 50% do NaNO₃) aumentou significativamente a produção de biomassa (1034 mg L⁻¹) e carboidratos (688,44 mg L⁻¹, ou 66,58% da biomassa seca). Outro tratamento eficaz foi a adição de 1000 mg L⁻¹ de bicarbonato de sódio sem privação de nitrogênio, que resultou em 930 mg L⁻¹ de biomassa e 641,79 mg L⁻¹ de carboidratos. A produção de lipídios também foi favorecida sob estresse nutricional, atingindo 207,48 mg L⁻¹ com a combinação de 1500 mg L⁻¹ de bicarbonato e 50% de redução de nitrogênio.⁷

Esses resultados indicam que *D. abundans* LGMM0013 é responsiva a mudanças nas condições de cultivo e capaz de modular sua fisiologia para aumentar o acúmulo de macromoléculas. Essa plasticidade metabólica é característica

desejável em cepas com aplicação biotecnológica, especialmente para produção de bioetanol a partir de carboidratos. O estudo também destaca a importância da identificação morfológica aliada à análise molecular para garantir precisão na taxonomia de microalgas.⁷

Portanto, ambos os artigos evidenciam estratégias complementares para a bioengenharia de microalgas: enquanto Gupta *et al.* demonstram a aplicação da engenharia genética para otimizar múltiplos produtos em uma cepa extremófila, Burgel *et al.* enfatizam a relevância da exploração de biodiversidade natural aliada a práticas de cultivo para maximizar a produção de biomassa e metabólitos. Esses avanços são fundamentais para ampliar a eficiência e sustentabilidade na produção de biocombustíveis e biomateriais a partir de microalgas.^{6,7}

Conclusões

Portanto, fica evidente que o uso de microalgas representa uma alternativa promissora e sustentável para a produção de biocombustíveis e bioproductos. O estudo de Gupta *et al.* demonstrou que, por meio da engenharia genética, é possível potencializar significativamente a produtividade de lipídios e amido em cepas extremófilas, viabilizando sua aplicação em escala comercial. Por outro lado, a pesquisa de Burgel *et al.* reforça a importância da exploração da biodiversidade nacional, mostrando que espécies nativas, como *Desmodesmus abundans*, possuem elevada capacidade de acúmulo de biomassa e carboidratos, especialmente sob condições de estresse controladas.^{6,7}

Ambas as abordagens de bioengenharia e a exploração de recursos naturais renováveis se mostram complementares e essenciais para o desenvolvimento de uma matriz energética mais limpa e eficiente, sem competir diretamente com a produção de alimentos. Contudo, é necessário avançar em estudos de viabilidade econômica, análise do ciclo de vida e desenvolvimento de tecnologias de cultivo e extração que tornem o processo mais acessível e sustentável em larga escala. Assim, o aproveitamento das microalgas consolida-se como uma estratégia promissora na busca por soluções energéticas alinhadas às demandas ambientais do século XXI.

Contribuições por Autor

A elaboração deste artigo, bem como a adição de determinadas observações, contou com a contribuição de Victor Porto Caetano.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

A Liga Acadêmica de Bioengenharia (LABIOENG) pelo apoio técnico, incentivo e ambiente colaborativo, essenciais para a realização deste trabalho.

Referências

- 1 International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2024, *IEA*, Paris, 2024.
- 2 M. S. Pinto, M. S. Martins, L. F. B. Campos and A. R. Oliveira, *Land*, 2020, **9**, 12.
- 3 Food and Agriculture Organization (FAO), Biofuels: Prospects, Risks and Opportunities, *FAO*, Rome, 2008.
- 4 FAO, Environmental and Health Impacts of Pesticides and Fertilizers, *FAO*, Rome, 2020.
- 5 A. M. Clivelaro, D. S. Alvim, M. T. S. D'Amelio, M. A.K. de Alcantara, *Rev. Gest. Soc. Ambient.*, 2025, **19**, 9314.
- 6 A. Gupta, J. V. D. Molino, K. M. J. Wnuk-Fink, A. Bruckbauer, M. Tessman, K. Kang, C. J. Diaz, B. Saucedo, A. Malik, M. D. Burkart and S. P. Mayfield, Engineering the novel extremophile alga *Chlamydomonas pacifica* for high lipid and high starch production as a path to developing commercially relevant strains, *ACS ES&T Engg.*, 2024.
- 7 B. Burgel, P. G. Ribas, P. C. Ferreira, M. F. Passos, B. Santos, D. C. Savi, T. A. V. Ludwig, J. V. C. Vargas, L. V. Galli-Terasawa and V. M. Kava, Morphology, molecular phylogeny and biomass evaluation of *Desmodesmus abundans* (Scenedesmaceae-Chlorophyceae) from Brazil, *Braz. J. Biol.*, 2022, **82**.
- 8 Udayan, Aswathy, et al. “Produção de microalgas com alto teor lipídico e seu potencial como fontes de nutraceuticos”. *Phytochemistry Reviews*, 2022, 1–28.
- 9 Deamici, Kricelle Mosquera, et al. “Aprimorando culturas de microalgas em águas residuais dessalinizadas de regiões semiáridas: uma avaliação da dinâmica de crescimento e do acúmulo de biomassa”. *Journal of Applied Phycology*, 2024, **36**, 1135–1142.
- 10 A. May, P. Fonseca and P. Firmino, Impactos ambientais causados pelos biocombustíveis, *Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2025.
- 11 Embrapa, Balanço de emissões de CO₂ biocombustíveis no Brasil, 2012.

Cascas de café e cacau como fontes de energia e fertilizantes, por meio da pirólise lenta

DOI: 10.5281/zenodo.17506856

Eduarda Lima Pereira Natal^{a*}

Brazil is one of the world's leading producers of coffee and cocoa, generating large amounts of agro-industrial residues such as husks, often discarded improperly. This study evaluated the thermochemical utilization of these residues via slow pyrolysis, aiming to produce biochar, bio-oil, and gas. Samples were analyzed for lignocellulosic composition and energy yield. Pyrolysis at 450 °C generated fractions with potential for agricultural and energy use. The biochar showed high carbon and nutrient content, suitable for soil amendment. Bio-oil had a higher yield in cocoa husks, while coffee husks produced more gas. Results indicate that slow pyrolysis is a viable route for agricultural waste valorization.

O Brasil é um dos principais produtores de café e cacau, gerando grandes volumes de resíduos agroindustriais, como cascas, que geralmente são descartadas inadequadamente. Este estudo avaliou o aproveitamento termoquímico dessas cascas por meio da pirólise lenta, visando à produção de biochar, bio-óleo e gás. As amostras foram analisadas quanto à composição lignocelulósica e rendimento energético. A pirólise a 450 °C resultou em frações com potencial para uso agrícola e energético. O biochar apresentou alto teor de carbono e nutrientes, sendo promissor como condicionador de solo. O bio-óleo teve maior rendimento nas cascas de cacau, enquanto as cascas de café geraram mais gás. Os resultados indicam que a pirólise lenta é uma estratégia viável de valorização de resíduos agrícolas.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Ciências Biológicas (ICB/UnB).

*E-mail: eduardanatallima@gmail.com

Palavras-chave: Pirólise lenta; biochar; resíduos agroindustriais; casca de café; casca de cacau.

Recebido em 17 de agosto de 2025,
Aprovado em 20 de setembro de 2025,
Publicado em 03 de novembro de 2025.

Introdução

O Brasil figura entre os maiores produtores mundiais de café e cacau, gerando anualmente milhões de toneladas de resíduos agroindustriais, como as cascas dos frutos, que geralmente são descartadas de forma inadequada. Estima-se que cerca de 2 milhões de toneladas de cascas de café e aproximadamente 185 mil toneladas de cascas de cacau sejam produzidas no país por ano. Esses resíduos, classificados como biomassa lignocelulósica, representam um passivo ambiental relevante, mas também uma oportunidade valiosa para transformação em produtos com alto valor agregado. A valorização desses resíduos por meio de tecnologias limpas e sustentáveis insere-se na lógica da bioeconomia e da economia circular, favorecendo não apenas a mitigação de impactos ambientais, como também a geração de novas cadeias produtivas.^{1,2}

Entre as tecnologias emergentes de conversão térmica da biomassa, destaca-se a pirólise lenta, um processo termoquímico realizado em atmosfera inerte, sob aquecimento controlado, que promove a decomposição dos principais constituintes lignocelulósicos — celulose, hemicelulose e

lignina — gerando três frações distintas: biochar (resíduo carbonizado), bio-óleo (fração líquida condensável) e gás (fração não condensável). A distribuição entre essas frações depende diretamente das características físico-químicas da biomassa, das condições operacionais do processo (como temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência), bem como da presença de compostos extrativos.^{3,4}

O biochar, resíduo carbonizado rico em carbono fixo e nutrientes minerais, apresenta potencial aplicação como condicionador de solo, adsorvente de poluentes e sumidouro de carbono. Já o bio-óleo, uma mistura complexa de compostos oxigenados, pode ser utilizado como fonte energética renovável em caldeiras ou motores adaptados, embora sua instabilidade química seja um desafio para uso em larga escala. A fração gasosa, composta majoritariamente por CO, CO₂, CH₄ e H₂, também possui potencial energético significativo.^{5,6}

Estudos anteriores indicam que resíduos ricos em lignina tendem a favorecer a produção de biochar, enquanto materiais com maiores teores de extrativos e carboidratos simples promovem maior geração de bio-óleo e gás. Neste contexto, torna-se relevante investigar a composição e o comportamento térmico de resíduos agrícolas como as cascas

de café e cacau, a fim de explorar seu potencial de reaproveitamento em diferentes frentes.^{7,8}

Diante disso, Milian-Luperón et al. tem como objetivo investigar o desempenho da pirólise lenta aplicada às cascas de café e cacau como estratégia para a produção de bioproductos com aplicações energéticas e agrícolas. A proposta se baseia em estudo experimental realizado com amostras provenientes de unidades agroindustriais da região oriental de Cuba, tomando como referência metodológica a análise termogravimétrica dos resíduos e os rendimentos obtidos para cada fração gerada. A partir de parâmetros energéticos previamente estabelecidos para biochar, bio-óleo e gás, o estudo também estimou o potencial energético total da biomassa analisada, contribuindo para a discussão sobre viabilidade técnica e escalabilidade do processo.

Metodologia

Foram utilizadas cascas de café e cacau como biomassa lignocelulósica para conversão termoquímica por pirólise lenta. As amostras de cascas de café foram coletadas de usinas de processamento agrícola localizadas na região oriental de Cuba, enquanto as cascas de cacau foram obtidas de uma fábrica de chocolate localizada na cidade de Baracoa. As coletas foram realizadas em intervalos regulares de 15 dias, garantindo representatividade e homogeneidade das amostras ao longo do período experimental. Aproximadamente 1 kg de cada tipo de resíduo foi coletado e armazenado em condições ambiente.

As amostras foram previamente secas e submetidas à análise composicional, visando quantificar os teores de celulose, hemicelulose e lignina, utilizando o método de Van Soest e Wine. Este método permite determinar as principais frações lignocelulósicas — fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA) e lignina residual — fornecendo informações sobre a composição química dos materiais vegetais, fundamentais para a interpretação do rendimento e das propriedades dos produtos da pirólise.¹ Previamente às análises, os materiais foram submetidos a uma extração com etanol, a fim de remover ceras, açúcares, resinas e outros compostos interferentes, conforme protocolo descrito por Sluiter et al.² Essa etapa de purificação foi essencial para garantir a reproduzibilidade dos resultados e a eficiência do processo pirolítico.

O processo de pirólise lenta foi realizado em um reator elétrico de bancada, sob atmosfera inerte, utilizando fluxo contínuo de nitrogênio para evitar oxidação da biomassa.

Cerca de 300 g de cada tipo de casca foram processadas separadamente, sendo inseridas no reator e aquecidas gradualmente a uma taxa de 10 °C/min até atingir a temperatura final de 450 °C. Uma vez alcançada essa temperatura, manteve-se a condição isotérmica por 60 minutos. O reator era provido de uma manta de aquecimento controlada eletronicamente e termopares estratégicamente posicionados para monitoramento contínuo da temperatura. Um parafuso helicoidal tipo Arquimedes foi empregado para manter a biomassa em movimento e garantir a distribuição térmica uniforme.

Durante o aquecimento, uma análise termogravimétrica em tempo real foi conduzida, com o objetivo de identificar os estágios de degradação térmica da hemicelulose, celulose e lignina, correlacionando os perfis de perda de massa com a temperatura. Ao final do processo, os produtos da pirólise foram separados em três frações principais: biochar (resíduo sólido não volátil), bio-óleo (fração líquida condensável) e gás não condensável. O biochar foi coletado diretamente do reator após o resfriamento; o bio-óleo foi capturado por meio de um sistema de condensação em serpentina refrigerada; e o gás foi contabilizado como diferença entre a massa inicial e as massas das frações sólida e líquida.

A fração sólida (biochar) foi caracterizada por análise elementar (C, H, N, O) e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR-ATR), de acordo com protocolos descritos por Antal and Grönli, com o intuito de identificar os grupos funcionais presentes. O potencial fertilizante foi avaliado indiretamente pela presença de macronutrientes (K, Ca, Mg), obtidos por espectroscopia de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).³

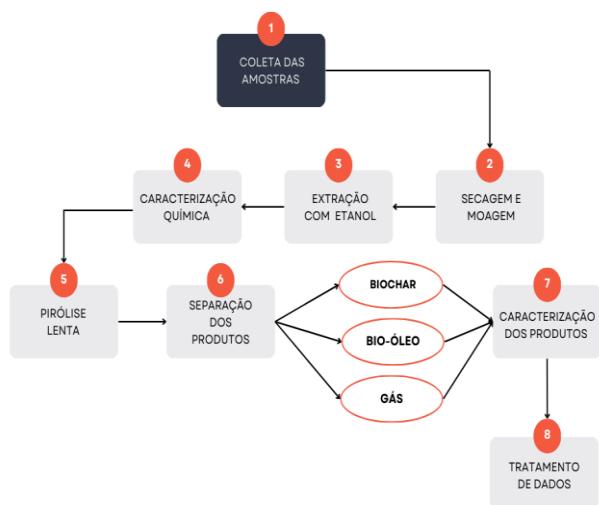
O rendimento percentual de cada fração (biochar, bio-óleo e gás) foi calculado com base na massa inicial da biomassa seca. Para estimativas energéticas, foram adotados poderes caloríficos médios: 18 MJ/kg para biochar, 17 MJ/kg para bio-óleo e 6 MJ/kg para gás.⁴ O potencial energético total foi projetado utilizando dados anuais da produção de resíduos no Brasil e em Cuba, visando explorar a aplicabilidade em larga escala. Os dados obtidos foram organizados em planilhas para posterior análise descritiva e comparação dos rendimentos entre as duas biomassas analisadas.

Os dados experimentais foram organizados e tratados utilizando o software Microsoft Excel®. Os valores de

rendimento para cada fração (biochar, bio-óleo e gás) foram expressos como média de três ensaios independentes. A dispersão dos resultados foi avaliada por meio do desvio padrão, e os dados comparativos entre as biomassas foram analisados por testes *t* de Student para amostras independentes, com nível de significância de 5% ($p < 0,05$), conforme recomendado em estudos de bioenergia.⁵

O processo estudado pode ser visualizado de forma resumida no fluxograma a seguir, que sintetiza as etapas principais do procedimento, facilitando a compreensão do método adotado.

Figura 1. Fluxograma do processo experimental de pirólise lenta. Elaboração própria.



Resultados e discussão

A pirólise lenta aplicada às cascas de café e cacau resultou em três frações principais: biochar, bio-óleo e gás não condensáveis, cujos rendimentos e características físico-químicas variaram em função da biomassa utilizada. A média de rendimento de biochar foi de 30,78% para as cascas de café e 31,10% para as cascas de cacau. Essa ligeira superioridade nas cascas de cacau pode ser atribuída ao seu maior teor de lignina, que é termicamente mais resistente e contribui para a formação de carbono fixo durante a carbonização. A literatura aponta que a lignina possui maior estabilidade térmica em comparação à celulose e hemicelulose, resultando em menor degradação volátil e maior formação de resíduo sólido.¹ A Tabela 1 apresenta a composição das cascas de café e cacau, evidenciando essa diferença.

Tabela 1. Composição lignocelulósica das cascas de café e cacau. Extraído da referência 1.

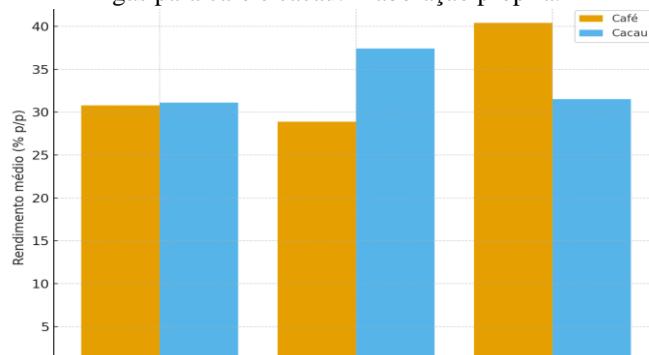
Componente	Casca de café	Casca de cacau
Extrativos (etanol)	12,3	15,8
Hemicelulose	22,4	20,5
Celulose	33,7	32,1
Lignina	19,6	23,3
Cinzas	4,28	5,80

A Tabela 2 e a Figura 2 mostram os rendimentos médios obtidos. As cascas de café apresentaram maior produção de gás (40,4%), enquanto as cascas de cacau favoreceram a formação de bio-óleo (37,4%). O rendimento de biochar foi semelhante em ambas (cerca de 31%). Esse comportamento confirma estudos anteriores que relacionam resíduos mais lignificados a maiores proporções de biochar, enquanto materiais com maiores teores de extrativos geram maior quantidade de bio-óleo e gases.²

Tabela 2. Rendimentos médios das frações obtidas pela pirólise lenta. Extraído da referência 2.

Fração	Casca de café	Casca de cacau
Biochar	30,78	31,10
Bio-óleo	28,9	37,4
Gás	40,4	31,5

Figura 2. Rendimentos comparativos de biochar, bio-óleo e gás para café e cacau. Elaboração própria.



O biochar obtido foi submetido à análise elementar (CHNO), que revelou teores elevados de carbono (aproximadamente 60% nas amostras de cacau e 58% nas de café), com baixos teores de hidrogênio e nitrogênio, o que indica um material aromático e altamente carbonizado. A razão molar H/C, com valores inferiores a 0,4, confirma o alto grau de aromaticidade, enquanto a razão O/C, em torno de 0,2–0,3, sugere a presença de grupos oxigenados residuais, o que favorece a reatividade superficial e capacidade de adsorção. A análise FTIR-ATR corroborou esses dados, evidenciando bandas associadas a ligações C=C aromáticas ($\sim 1.600\text{ cm}^{-1}$), estiramentos de grupos carboxílicos ($\sim 1.700\text{ cm}^{-1}$) e fenóis ($\sim 3.400\text{ cm}^{-1}$), confirmando a presença de funcionalidades químicas ligadas à capacidade de retenção de água, adsorção de íons metálicos e interação com nutrientes no solo.³ A Tabela 3 apresenta os resultados da análise elementar dos biochars derivados das duas biomassas.

Tabela 3. Composição elementar dos biochars. Extraído da referência 3.

Elemento	H-CHAR (café)	C-CHAR (cacau)
Carbono	59,32	60,37
Hidrogênio	2,11	2,06
Nitrogênio	1,79	1,67
Oxigênio	32,5	31,1
Cinzas	4,28	5,80

Do ponto de vista agronômico, o biochar das cascas de cacau apresentou maiores teores de macronutrientes (K, Ca e Mg), conforme analisado por espectroscopia de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), o que reforça seu potencial como condicionador de solos ácidos, característica comum em regiões tropicais. Além disso, o biochar apresenta pH alcalino e alta capacidade de troca catiônica (CTC), propriedades relevantes para reestruturação do solo, sequestro de carbono e redução da lixiviação de nutrientes.³ Quanto à fração líquida, o bio-óleo obteve rendimento de 37,4% nas cascas de cacau e 28,9% nas cascas de café. Essa diferença expressiva pode estar relacionada ao maior conteúdo de extractos nas cascas de cacau, como lipídeos, compostos fenólicos e açúcares solúveis, que são termicamente decompostos em produtos voláteis durante o aquecimento. O bio-óleo obtido apresenta coloração escura, odor característico de alcatrão vegetal e viscosidade moderada,

contendo uma mistura complexa de fenóis, ácidos orgânicos, cetonas, ésteres e álcoois, conforme reportado em estudos semelhantes.⁴ Apesar do elevado teor de oxigênio e da instabilidade química, o bio-óleo é considerado uma alternativa promissora de combustível líquido renovável, principalmente para uso em caldeiras ou motores adaptados.

A fração gasosa apresentou rendimento superior nas cascas de café (40,4%), o que pode ser explicado pela maior proporção de celulose e hemicelulose nesse resíduo. Essas frações decompõem-se a temperaturas mais baixas, liberando produtos gasosos como CO, CO₂, CH₄ e pequenas quantidades de H₂. A composição do gás, apesar de não ter sido caracterizada cromatograficamente neste estudo, é similar à descrita na literatura para pirólise lenta de resíduos lignocelulósicos, com poder calorífico inferior (PCI) médio estimado em 6 MJ/kg.⁵ A Tabela 4 resume o potencial energético estimado das cascas de café e cacau, considerando os produtos gerados pela pirólise lenta.

Tabela 4. Potencial energético teórico estimado. Extraído das referências 4 e 5.

Biomassa	Biochar	Bio-óleo	Gás	Total
Cascas de café	3.870	3.506	915	8.291
Cascas de cacau	697	765	78	1.384

A análise do potencial energético total das biomassas foi realizada com base nos rendimentos obtidos e nos poderes caloríficos médios das frações. As cascas de café apresentaram potencial energético estimado de 8.291 MWh por ano, enquanto as cascas de cacau alcançaram 1.384 MWh, considerando-se a produção anual nacional de resíduos e a eficiência teórica de conversão. Esses valores demonstram a viabilidade técnica da pirólise como estratégia de aproveitamento energético em regiões com baixa infraestrutura, substituindo parcialmente fontes fósseis e contribuindo para a autossuficiência energética de comunidades agrícolas.

Além da geração de energia, a conversão dos resíduos por pirólise permite mitigar impactos ambientais relacionados ao acúmulo de resíduos sólidos e à emissão de gases de efeito estufa (GEE), já que o biochar atua como sumidouro de carbono de longo prazo no solo. Tais características tornam a tecnologia coerente com os princípios da bioeconomia e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS),

especialmente os ODS 7 (energia limpa e acessível), ODS 12 (produção e consumo responsáveis) e ODS 13 (ação contra a mudança global do clima).

Conclusões

A pirólise lenta demonstrou ser uma alternativa viável e sustentável para o aproveitamento das cascas de café e cacau, resíduos agrícolas abundantes e frequentemente subutilizados. O processo permitiu a geração de três frações principais — biochar, bio-óleo e gás — com rendimentos distintos em função da composição de cada biomassa. As cascas de cacau, mais lignificadas, favoreceram a produção de biochar com alto teor de carbono e macronutrientes, enquanto as cascas de café apresentaram maior geração de gás, devido à maior concentração de celulose e hemicelulose.

O bio-óleo, por sua vez, foi mais expressivo nas cascas de cacau, refletindo a presença de extractos voláteis. Esses resultados evidenciam o potencial técnico e energético da pirólise como rota de valorização de resíduos agroindustriais, promovendo a geração de insumos para uso agrícola e energético. A adoção dessa tecnologia contribui com os princípios da bioeconomia, da economia circular e com metas ambientais globais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Contribuições por autor

Concepção do estudo, revisão bibliográfica, análise de dados, redação e revisão final do manuscrito são de Eduarda Natal.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

À Liga Acadêmica de Bioengenharia (LABIOENG), agradeço pelo incentivo contínuo, apoio técnico e troca de conhecimentos ao longo da construção deste artigo de revisão. A colaboração e o ambiente acadêmico estimulante proporcionados pela Liga foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- 1 A. Demirbas, *Energy Conversion and Management*, 2001, **42**, 1357–1378.
- 2 P. Basu, *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*, Academic Press, 2013.
- 3 P. Lv, Z. Yuan, C. Ma, L. Wu and H. Chen, *Fuel Processing Technology*, 2007, **88**, 799–805.
- 4 P. C. A. Bergman, A. R. Boersma, J. H. A. Kiel, M. J. Prins, K. J. Ptasinski and F. J. J. G. Janssen, *Energy Research Centre of the Netherlands (ECN)*, 2005.
- 5 A. Funke and F. Ziegler, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2010, **4**, 160–177.
- 6 J. A. Libra, K. S. Ro, C. Kamann, A. Funke, N. D. Berge, Y. Neubauer, M. Titirici, C. Fühner, O. Bens, J. Kern and K. Emmerich, *Biofuels*, 2011, **2**, 71–106.
- 7 J. J. Manya, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, **16**, 2321–2344.
- 8 D. Mohan, C. U. Pittman and P. H. Steele, *Energy & Fuels*, 2006, **20**, 848–889.
- 9 J. Lehmann and S. Joseph, *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*, Routledge, 2015.
- 10 M. Ahmad, A. Rajapaksha, J. Lim, M. Zhang, N. Bolan, D. Mohan, M. Vithanage, S. Lee and Y. Ok, *Chemosphere*, 2014, **99**, 19–33.

Produção de diesel verde em escala piloto derivado de microalgas

DOI: 10.5281/zenodo.17508354

Sara Karolina dos Santos^{a*}

Biofuels derived from biomass are currently an explored energy alternative. Microalgae stand out as a promising raw material for producing these biofuels due to their rapid growth and high lipid content. However, this scarcity of data related to large-scale processes limits the effective implementation of this alternative energy source. So, this article is a review of a study on the feasibility of transitioning processes developed in the laboratory to pilot and commercial-scale applications.

Os biocombustíveis derivados de biomassa são uma alternativa de energia explorada atualmente. As microalgas destacam-se como uma matéria-prima promissora para a produção desses biocombustíveis em razão do seu rápido crescimento e elevado teor lipídico. No entanto, a escassez de dados referentes a processos em larga escala limita implementação efetiva dessa fonte de energia alternativa. Com isso, este artigo é uma revisão sobre um estudo da viabilização da transição de processos desenvolvidos em laboratório para aplicações em escala piloto e comercial.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: karolinaskw1@gmail.com

Palavras-chave: Microalgas; biomassa; diesel verde; biocombustíveis.

Recebido em 05 de agosto de 2025,
Aprovado em 20 de setembro de 2025,
Publicado em 03 de novembro de 2025.

Introdução

A exploração excessiva de recursos não renováveis tem contribuído para as mudanças climáticas, o que aumenta a necessidade de fontes de energia sustentáveis e ambientalmente responsáveis. Diversas alternativas energéticas estão sendo exploradas atualmente, entre elas, os biocombustíveis derivados de biomassa. A biomassa consiste em materiais orgânicos que podem ser transformados em biocombustíveis, provenientes de fontes variadas, como plantas, algas ou subprodutos de animais e suas formas processadas.^{1,2}

As microalgas têm se destacado como uma fonte promissora de biomassa para produção de biocombustíveis renováveis, devido a sua capacidade de sintetizar compostos de alta densidade energética, de interesse comercial. Elas são cultivadas preferencialmente em fotobiorreatores, permitindo assim a redução da área de cultivo, aumentando a produtividade e proporcionando um potencial de expansão para a escala industrial. Como organismos autotróficos, as microalgas conseguem fixar dióxido de carbono, utilizando-o como fonte primária de carbono. Assim, sua alta produtividade de biomassa e eficiência na síntese e acumulação de ácidos graxos as tornam ideais para a produção de hidrocarbonetos.^{1,3}

Os hidrocarbonetos produzidos pelas microalgas possuem estruturas químicas e propriedades físicas semelhantes às do diesel obtido em refinarias de petróleo. Isso possibilita que sejam utilizados diretamente em sua forma pura ou misturados em qualquer proporção, sem necessidade de ajustes nos motores a diesel, tornando-os um substituto ideal para os combustíveis fósseis convencionais. O diesel verde de microalgas é uma mistura de hidrocarbonetos, como alcanos e alcenos, composta de frações de cadeia curta e longa. Assim como o biodiesel, o diesel verde apresenta a vantagem de ser originado de fontes biológicas, com baixo impacto ambiental, sendo diferenciados em seus processos de produção.⁴

Na produção do diesel verde, a conversão do óleo presente na biomassa é uma etapa crítica, pois envolve processos como extração e destilação. As principais estratégias exploradas para a extração de óleo são a prensagem de óleo, extração assistida por ultrassom e extração com solventes. Esta última se destaca por sua alta eficiência, baixo custo e simplicidade operacional. Porém, quando usados na extração de óleos de microalgas, solventes não polares têm dificuldade de penetrar nas células, por causa das ligações de hidrogênio formadas entre a membrana, ligadas a lipídios e proteínas na célula da alga. Como solução, pode-se utilizar uma mistura de solventes polares e não polares: o solvente polar quebra as ligações e o não polar extraí os lipídios.^{1,5}

Essa fração lipídica extraída é separada por destilação, que utiliza a diferença de volatilidade dos compostos para purificá-los em diferentes temperaturas. A destilação fracionada se destaca por ser uma separação mais eficiente dos compostos, devido aos múltiplos ciclos de evaporação e condensação dentro das colunas de destilação.⁶

Os biocombustíveis derivados de microalgas apresentam um amplo potencial. Muitos estudos analisaram a produção de hidrocarbonetos a partir de microalgas como uma alternativa ao óleo diesel, com diferentes condições de cultivo, espécies e técnicas de produção. Ainda assim, sua implementação possui obstáculos, por conta da escassez de dados em escala industrial. Para que sua comercialização seja bem-sucedida é necessário que haja uma transição eficaz dos processos desenvolvidos em escala laboratorial para as operações em escala piloto e industrial.^{3,7,8,9}

Dessa forma, o artigo de referência analisado trata da realização de experimentos para a produção de diesel verde em escala comercial, com o objetivo de avaliar sua competitividade no mercado, além de oferecer uma compreensão abrangente dos desafios e perspectivas dos biocombustíveis derivados de microalgas.¹

Metodologia

A metodologia utilizada no artigo de referência consistiu na utilização da microalga *Tetradesmus obliquus*, pertencente a divisão Chlorophyta e à família Scenedesmaceae. A microalga foi cultivada em um fotobiorreator fechado de pequeno porte industrial, utilizando como meio de cultivo resíduos de dejetos suínos previamente biodigeridos. Os experimentos foram realizados durante um tempo de residência de 15 dias, e após cada ciclo, a biomassa foi colhida e processada. A biomassa obtida foi submetida à secagem e colheita, seguida pela extração de óleo usando um método de extração com solvente quente, e por destilação para purificação dos compostos.¹

Três experimentos diferentes de extração e destilação foram conduzidos, cada um utilizando diferentes combinações de solventes com as seguintes condições: condição 1 (70% de hexano e 30% de etanol), condição 2 (50% de hexano e 50% de etanol) e condição 3 (100% hexano). Cada condição experimental exigiu 1,5 Kg de biomassa microalgal seca e moída e 7,5 L de solvente orgânico. A duração estimada do processo foi de 3 h. Após a extração, os componentes restantes

são direcionados para um sistema de separação sólido-líquido para a remoção de resíduos celulares.

Foram realizadas análises da caracterização dos hidrocarbonetos por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-MS), de parâmetros físico-químicos dos hidrocarbonetos produzidos, também uma análise de custos e desafios e oportunidades futuras para o diesel verde em escala comercial. Para a análise de custos, cada etapa foi avaliada com base no custo médio mensal da eletricidade, com base nos dados da Administração de Informação de Energia dos EUA. As análises foram realizadas em triplicata e as incertezas foram dadas segundo as normas da ASME, com precisão de 95% definida como duas vezes o desvio padrão das médias experimentais.¹⁰

Resultados e discussão

Com base nos resultados obtidos pelos pesquisadores, observou-se que a extração com uma mistura de solventes (50% hexano e 50% etanol) obteve melhor rendimento que em comparação com o hexano puro. A combinação de um solvente não polar (hexano) e um solvente polar (etanol) favoreceu a eficiência da extração, uma vez que o etanol auxilia na ruptura de interações hidrofílicas da parede celular, enquanto o hexano promove a solubilização eficiente de lipídios.

Na destilação fracionada, nos resultados das condições 1 e 2, os rendimentos foram mais favoráveis, que na condição 3, que apresentou baixo rendimento. Além disso, as amostras fracionadas de óleo de microalgas obtidas apresentaram aparência física semelhantes em todas as condições experimentais.

Na análise de caracterização de hidrocarbonetos por CG, foram detectados 25 compostos de várias classes químicas em cada destilado, incluindo hidrocarbonetos, álcoois, ésteres e ácidos carboxílicos. A presença de hidrocarbonetos como alcenos e alcanos foi predominante, e a proporção de solvente utilizada influenciou na produção de alcanos. Além disso, hidrocarbonetos específicos foram identificados, como 4-metil-1-deceno, 1-pentadeceno, 8-heptadeceno, 9-heneicoseno e 2-dodeceno.

Os parâmetros analisados para a análise das propriedades físico-químicas foram a densidade, teor de enxofre total e valor calorífico superior e inferior. A análise foi realizada considerando somente as condições 1 e 2, a condição 3 não foi analisada por conta do seu baixo rendimento. Os

resultados indicaram que o óleo de microalgas apresentou densidade e valores caloríficos compatíveis com os padrões do diesel fóssil, atendendo aos requisitos de qualidade estabelecidos. Entretanto, foi observado que as amostras de óleo destilado apresentaram maior teor de enxofre em comparação com o diesel convencional. Indicando a necessidade de maior refinamento no processo de produção.

Na análise de custo, houve variações dependendo das condições experimentais. Notou-se, que conforme a eficiência na extração de óleo aumenta, a quantidade de biomassa necessária diminui, resultando na diminuição no custo de produção. Logo, a condição 1, que apresenta uma mistura de solvente de 70% hexano e 30% etanol foi o mais economicamente viável, pois extraiu uma maior quantidade de óleo com uma menor necessidade de biomassa inicial.

Por fim, a produção de biocombustíveis de microalgas depende de vários fatores. O processo de diesel verde de microalgas, inclui estágios de cultivo, colheita, secagem, extração e destilação para a conversão final em diesel. Cada um desses estágios apresenta desafios econômicos e de eficiência, para a expansão da produção em escala comercial. A Tabela 1 mostra os principais desafios na produção de diesel verde de microalgas em escala comercial.

Tabela 1. Principais desafios e oportunidades na produção de diesel verde. Extraído da referência 1.

Desafios	Oportunidades
Consumo de energia	Integração de fontes de energia renováveis
Alto custo de capital e operacionais	Investimento em pesquisa e desenvolvimento
Uso e recuperação de solventes	Desenvolvimento de solventes verdes; métodos de extração sem solventes; recuperação de solventes
Integração de processos	Técnicas de integração e otimização de processos; uso de subprodutos para coprodutos
Aumento de escala	Estratégias de expansão bem sucedidas
Concorrência de mercado	Aceitação do mercado; apoio político; competitividade com combustíveis fósseis

Visando superar essas dificuldades é necessário pesquisa e desenvolvimentos contínuos, para otimização das fases do processo; redução de custos e aprimoramento da eficiência energética na produção; além da integração de fontes de energia renováveis e o uso de tecnologias inovadoras que são essenciais para superar essas barreiras e tornar viável a produção em grande escala.

Conclusões

O estudo avaliou a extração de óleo de microalgas utilizando-se diferentes composições de solventes, seguido de destilação fracionada da biomassa produzida com objetivo de avaliar sua viabilidade como fonte de biocombustível.

Os resultados revelaram que a mistura de solventes (50% hexano e 50% de etanol) foi mais eficiente que a extração usando somente hexano puro e o mesmo resultado se deu para a destilação fracionada. A caracterização dos hidrocarbonetos identificou 25 compostos, com predominância de alcanos. Essa distribuição foi fortemente influenciada pela composição do solvente utilizado na extração. Nos parâmetros físico-químicos, o óleo de microalgas se mostrou semelhante com o diesel de fósseis em termos de densidade e valor calorífico, porém o teor de enxofre se mostrou maior, indicando a necessidade de um maior refinamento no processo de produção. Por último, na análise de custo do processo, a mistura (70% hexano e 30% etanol) se mostrou mais econômica, extraíndo maior quantidade de óleo.

O estudo também apontou o potencial do uso de óleo de microalgas como uma alternativa sustentável para a produção de diesel verde renovável. O processo de produção é promissor e proporciona vários insights para purificação de compostos, além de abrir possibilidades para futuras aplicações de biocombustíveis. A bioengenharia tem um papel importante na inovação dos biocombustíveis de microalgas, melhorando sua eficiência, viabilidade econômica e impacto ambiental. Com isso, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos nessa área podem levar a soluções energéticas mais sustentáveis.

Contribuições por Autor

A escrita do presente artigo e a inclusão de algumas observações são de Sara Karolina dos Santos.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

À Liga Acadêmica de Bioengenharia (LABIOENG), agradeço pelo incentivo e pelo apoio prestado ao longo de todo processo de escrita deste artigo.

Referências

- 1 G. Costa, J. V. C. Vargas, W. Balmant, L. P. Ramos, A. B. Mariano, A. C. D. Oliveira, T. A. Da Silva, I. A. Severo, J. C. Ordonez, D. L. Sousa and V. F. Dos Santos, Unlocking pilot-scale green diesel production from microalgae, *Journal of Environmental Management*, 2024, **368**, 122141.
- 2 S. P. D. Silva, A. S. V. D. Costa, S. L. B. D. Santos and M. L. D. Laia, A IMPORTÂNCIA DA BIOMASSA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA, *PA*, 2021, **19**, 557.
- 3 G. Costa, J. V. Coelho Vargas, W. Balmant, L. P. Ramos, A. Zandoná Filho, D. M. Taher, A. B. Mariano, C. I. Yamamoto, D. Conceição and V. M. Kava, Microalgae-Derived Green Diesel, *Chemical Engineering & Technology*, 2022, **45**, 890–897.
- 4 N. Asikin-Mijan, J. C. Juan, Y. H. Taufiq-Yap, H. C. Ong, Y.-C. Lin, G. AbdulKareem-Alsultan and H. V. Lee, Towards sustainable green diesel fuel production: Advancements and opportunities in acid-base catalyzed H₂-free deoxygenation process, *Catalysis Communications*, 2023, **182**, 106741.
- 5 H. Nam, J. Choi and S. C. Capareda, Comparative study of vacuum and fractional distillation using pyrolytic microalgae (*Nannochloropsis oculata*) bio-oil, *Algal Research*, 2016, **17**, 87–96.
- 6 B. Guieysse and M. Plouviez, Microalgae cultivation: closing the yield gap from laboratory to field scale, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2024, **12**, 1359755.
- 7 G. W. O’Neil, A. R. Culler, J. R. Williams, N. P. Burlow, G. J. Gilbert, C. A. Carmichael, R. K. Nelson, R. F. Swarthout and C. M. Reddy, Production of Jet Fuel Range Hydrocarbons as a Coproduct of Algal Biodiesel by Butenolysis of Long-Chain Alkenones, *Energy Fuels*, 2015, **29**, 922–930.
- 8 J. Zhou, M. Wang, J. A. Saraiva, A. P. Martins, C. A. Pinto, M. A. Prieto, J. Simal-Gandara, H. Cao, J. Xiao and F. J. Barba, Extraction of lipids from microalgae using classical and innovative approaches, *Food Chemistry*, 2022, **384**, 132236.
- 9 S. Vidyashankar, K. S. VenuGopal, G. V. Swarnalatha, M. D. Kavitha, V. S. Chauhan, R. Ravi, A. K. Bansal, R. Singh, A. Pande, G. A. Ravishankar and R. Sarada, Characterization of fatty acids and hydrocarbons of chlorophycean microalgae towards their use as biofuel source, *Biomass and Bioenergy*, 2015, **77**, 75–91.
- 10 R. E. Smith and S. Wehofer, From Measurement Uncertainty to Measurement Communications, Credibility, and Cost Control in Propulsion Ground Test Facilities, *Journal of Fluids Engineering*, 1985, **107**, 165–172.

Uso de fibrina e agarose marinha para geração de tecidos humanos

DOI: 10.5281/zenodo.17506913

Juliane Yurika Alves Sato^{a*}

This article is a review of the study by O. Ortiz-Arrabal *et al.*, aiming to show that the development of an ideal biomaterial for clinical use is one of the main objectives of current research in tissue engineering. The study explores fibrina-agarose biomaterials combining five agarose types at four concentrations. Initial assessments confirmed biocompatibility and variable biomechanical properties. *In vivo* testing demonstrated systemic and local biocompatibility, with macrophages presence, indicating favorable tissue regeneration. The findings support fibrina-agarose biomaterials for clinical use. These advancements enhance their potential for engineering human tissue.

Este artigo é uma revisão do estudo de O. Ortiz-Arrabal *et al.*, a fim de mostrar o desenvolvimento de um biomaterial ideal para uso clínico é um dos principais objetivos das pesquisas atuais em engenharia de tecidos. Este estudo explora materiais de fibrina-agarose com 5 tipos de agarose em 4 concentrações diferentes. As avaliações iniciais confirmaram a biocompatibilidade e propriedades biomecânicas variáveis. Os estudos *in vivo* demonstraram biocompatibilidade local e sistêmica, com presença de macrófagos, que são indicadores favoráveis de regeneração de tecidos. Os resultados sustentam o uso clínico de biomateriais de fibrina-agarose. Esses avanços melhoram o potencial para engenharia de tecidos humanos.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Ciências Biológicas (IB/UnB).

*E-mail: yurikajuliane@gmail.com

Palavras-chave: Agarose; biocompatibilidade; biomateriais; engenharia de tecidos.

Recebido em 06 de agosto de 2025,

Aprovado em 20 de setembro de 2025,

Publicado em 03 de novembro de 2025.

Introdução

Diversos tipos de biomateriais têm sido empregados na produção bioartificial de tecidos por meio da engenharia de tecidos.¹ Em geral, os biomateriais utilizados devem apresentar características de biocompatibilidade, biodegradabilidade e caráter não-alergênico. As propriedades biomecânicas são particularmente importantes, uma vez que a rigidez e a elasticidade influenciam diretamente a capacidade regenerativa dos tecidos bioartificiais.²

A fibrina vem sendo extensivamente estudada na engenharia de tecidos, devido a sua fácil obtenção e suas propriedades biológicas. Essa proteína fibrilar, envolvida na coagulação sanguínea, é capaz de formar matrizes bioativas tridimensionais altamente biocompatíveis.³ Uma vez que pode ser retirado do sangue do próprio paciente, o procedimento elimina o risco de o sistema imune rejeitar e diminui os custos de manufatura. A fibrina tem sido utilizada na geração de diversos tecidos, como os ósseos, cartilaginosos, epiteliais, cardíacos, entre outros. Entretanto, as propriedades mecânicas dos hidrogéis de fibrina em conjunto com a rápida degradação trazem a necessidade de melhorar propriedades intrínsecas desse biomaterial.

Polissacarídeos marinhos são outros biomateriais utilizados na engenharia de tecidos para diferentes tecidos e órgãos. Um exemplo é a agarose, um polissacarídeo natural com propriedades de solubilidade em água, auto-gelificação controlada e alta biocompatibilidade. Estudos mostram que a agarose é capaz de melhorar a proliferação e atividade celular.

Diversos tipos de agarose foram descritos, e pesquisas demonstraram que a concentração de tipos específicos de agarose pode influenciar显著mente as propriedades biomecânicas, funções biológicas e compatibilidade, em aplicações específicas.¹ Entretanto a agarose possui limitações, principalmente no que diz respeito a diferenciação celular, por essa razão a agarose é combinada com outros biomateriais com melhores propriedades celular, como a fibrina.

Biomateriais de fibrina-agarose (FA) foram descritos primeiramente para a geração de substitutos de córnea, posteriormente para diversos tecidos e órgãos, como pele, nervos, tendões, esclera e mucosa oral.⁴ Estudos anteriores concluíram que a combinação de fibrina agarose resultou em melhorias significativas em comparação com os dois biomateriais isolados.⁵ Porém, a combinação de fibrina com diferentes tipos de agarose para avaliação de um possível aperfeiçoamento não foi avaliada até então.

O objetivo deste estudo foi a revisão do trabalho de O. Ortiz-arrabal *et al.*, mostrando o desenvolvimento de um biomaterial ideal para uso clínico, por meio da avaliação de diversas agaroses em concentrações diferentes.

Metodologia

Os pesquisadores geraram tecidos bioartificiais FA usando 5 tipos diferentes de agarose (D1LE, D2LE, LM, MS8 e D5) e 4 concentrações (0.05, 0.1, 0.2 e 0.3%).

Tabela 1. Agaroses utilizadas no estudo. Tabela autoral.

	ORIGEM	HISTERESE	FORÇA DO GEL (C°)
D1LE	Nativas, extraídas de várias espécies	36,8-88,3	1,5% de 2990g/cm ²
D2LE	de alga vermelha	4,06-87,8	1,5% de 2310 g/cm ²
D5	Gracilaria e Gelldium	36,2-88,1	1.5% de 4120 g/cm ²
MS8	Materiais derivados sujeitos a modificações	34-78,5	1,5% de 3590 g/cm ²
LM	químicas adicionais	26,1-64,9	1% de 1100 g/cm ²

Cultura das células

Foram feitas biópsias para geração de culturas de fibroblastos da derme, que foram previamente lavadas com solução salina tamponada com fosfato (PBS) (Merck Life Science, St. Louis, MO, EUA) e digerida por 6 horas em uma solução de *Clostridium histolyticum* collagenase tipo I de 2mg/mL (Gibco – Thermo Fischer Scientific, Waltham, MA, EUA) em Meio de Eagle modificado por Dulbecco (DMEM, Merck, Darmstadt, Alemanha) em 37°C. A solução foi colocada no centrifugador por 10 minutos em 1000 rpm, e então cultivas em DMEM médio com suplemento de 10% de sérum fetal bovino (FBS) e 1% antibiótico-antimicótico (100.000 unidades de penicilina, 100 mg de estreptomicina e 250 µg de anfotericina B por litro; ref. A5955, Merck, Darmstadt, Alemanha).

Geração dos tecidos bioartificiais usando fibrina e fibrina-agarose

Tabela 2. Características da geração de tecidos bioartificiais. Tabela autoral.

	Bio mat eria 1	Plasma human o (µL)	DME M (µL)	Ácido tranex âmico (µL) *	2% Ca Cl2 **	Adição ao volume final
F-0	Fibr ina	760	75 com 5000 fibrob lastos	15	50	100 µL de PBS por mL
FA	Fibr ina + Aga rose	760	75 com 5000 fibrob lastos	15	50	Agaros e derretida em PBS

* Amchafibrin 5mg/mL, MEDA Pharma SL, Madrid, Espanha

** (Merck)

As misturas foram aliquotadas em placas para cultivo de células de 6 poços (Corning Life Sciences, Corning, NY, EUA) e incubados a 37°C. Então os tecidos bioartificiais foram extraídos das placas de cultura e passaram por compressão plástica.

Análise da viabilidade celular

Foram feitas sextuplicatas utilizando os kits LIVE/DEAD (Life Technologies, Carlsbad, CA, USA). Após 48 horas da geração dos tecidos bioartificiais, retirou-se um fragmento de aproximadamente 3 mm³, sujeitado a uma incubação de 5 minutos em uma mistura de calceína e iodeto de propídio. Posteriormente os tecidos foram lavados com PBS e depositados em lamínulas de vidro. As lamínulas foram observadas utilizando um microscópio Nikon Eclipse i90 (Nikon, Tóquio, Japão), as imagens fluorescentes foram usadas nos canais verde e vermelho para análise de células vivas e mortas, respectivamente.

Avaliação biomecânica

Sextuplicatas foram feitas utilizando o analisador biomecânico modelo 5943 (Instron Corp, Norwood, MA, EUA) em conjunto com o software BlueHill 3 Material Testing. As amostras, com 3 cm de comprimento e 1 de largura,

foram fixadas entre os pratos do analisador, com 1 cm entre eles.

Análise *in vivo*

Cada biomaterial foi implantado no subcutâneo das costas de ratos machos Wistar (n=4) com 12 semanas, após aprovação pelo comitê de ética (CEEA), código de protocolo 19/01/2021/053. Cada animal recebeu 4 concentrações de um dos biomateriais, implantados com 4 cm de distância entre eles. Quatro animais foram sujeitados aos procedimentos cirúrgicos sem implante de materiais para controle. Totalizando 28 animais, que foram eutanasiados 30 dias após. No momento da eutanásia foram retiradas amostras de sangue de cada rato, analisados posteriormente com o analisador automático Sysmex KX-21N e um analisador químico clínico Cobas c311 (Roche, Basel, Suíça).

Histologia, histoquímica e imunohistoquímica

Foram dissecadas e fotografadas as regiões implantadas no momento da eutanásia. As regiões e cinco órgãos principais extraídos de cada rato foram fixados em formalina, desidratados e embebidos em parafina. Os tecidos foram corados com hematoxilina-eosina e tricoma de Masson. Utilizando os marcadores CD86 E CD206 foi avaliado a presença de macrófagos do tipo M1 e M2, respectivamente. A metaloproteína MMP14 foi utilizada na análise da remodelação da matriz. As amostras foram desparafinadas e reidratadas, o antígeno foi recuperado com tampão de citrato pH 6 (Merck). H202 (Panreac Química S.L.U., Barcelona, Espanha) e caseína e soro de cavalo (Vector Laboratories, Burlingame, CA, EUA) foram adicionados à solução. Os tecidos ficaram em incubação durante a noite em diluição 1:200 e 1:800 de anticorpos primários anti-CD86 ou anti-CD206. As seções foram lavadas com PBS, incubadas com solução de anticorpo secundário com peroxidase pronta para uso (Vector Laboratories, Burlingame, CA, EUA). Foram lavados novamente em PBS, incubados com solução de diaminobenzina (Vector Laboratories, Burlingame, CA, EUA) e enfim coradas com hematoxilina de Harry.

Quantificação e análise estatística

Os hidrogéis tiveram sua taxa de biodegradação calculada através da área ocupada pelo enxerto. A composição da matriz extracelular foi analisada por histoquímica (picrosírius vermelho e azul de alcian) e imunohistoquímica (MMP14), determinando a intensidade de cada método. Todos com o software ImageJ (Versão 1.53k, National Institutes of Health, Bethesda, MD, EUA). Para CD86 E CD206, o número de células com sinal positivo foi determinado em cada área de

cada amostra. Foram selecionados quadrados de 70 x 70 μL aleatoriamente em cada imagem. Para cada variável foram calculados média e desvio padrão, analisados usando o Teste Shapiro-Wilk. Para viabilidade de célula e parâmetros biomecânicos também foram calculados média e desvio padrão de grupos globais das amostras, analisados usando Real Statistics (Dr. Charles Zaiontz, Purdue University, West Lafayette, IN, EUA). ANOVA com o teste de Tukey post-hoc foi utilizada.

Resultados e discussão

Um dos objetivos principais deste estudo é o desenvolvimento de um biomaterial ideal para uso clínico. Os biomateriais apresentaram alta biocompatibilidade *ex vivo*. Mais de 95% dos fibroblastos dentro do hidrogel permaneceram vivos em todos os grupos de estudo, e as diferenças entre o grupo controle não foram estatisticamente significantes.

Em relação as propriedades biomecânicas, todos os biomateriais FA formaram um hidrogel sólido e homogêneo, com exceção do FA contendo D2LE com 0,3% de concentração. As demais amostras mostraram que o tipo e concentração de agarose tem influência nas propriedades biomecânicas. Os resultados do grupo global de amostras de FA foram显著mente maiores que todas as agaroses, de acordo com o módulo de Young, um indicador de rigidez. A comparação global de FA também mostrou que F-D1LE tem rigidez significantemente maior que F-D2LE, F-LM, F-MS8 e F-D5. Entretanto, não existem diferenças significativas entre F-D2LE, F-LM, F-MS8 e F-D5 ($p > 0,05$). A rigidez foi significantemente maior na maioria dos biomateriais FA quando comparados com as amostras F-0.

Para tensão de fratura e maior deformação, houve aumento significativo no grupo global F-LM em comparação com os demais, com os maiores valores encontrados em 0,05%. Sobre os efeitos sistêmicos *in vivo*, o enxerto não trouxe alteração nos componentes do sangue. As análises histológicas dos cinco órgãos vitais não apresentaram diferenças entre os grupos. Nenhum dos grupos mostrou sinais de inflamação, necrose, fibrose ou transformação maligna. Todos os biomateriais se integraram ao tecido dos ratos. FA com as maiores concentrações de agarose foram detectáveis após 30 dias, entretanto, as menores concentrações não foram detectadas macroscopicamente, igual aos resultados de F-0 e grupo controle.

Os biomateriais FA com as maiores concentrações de agarose também tenderam a permanecer no local do implante, diferente de F-0 e FA com baixos níveis de agarose. Uma maior concentração de agarose é associada a uma melhor manutenção do hidrogel, no entanto diferentes tipos de agarose tiveram perfis variados na taxa de biodegradação. As maiores taxas de agarose apresentaram menores teores de colágeno quando comparados aos grupos controle e F-0, para as menores taxas os resultados não foram significativamente diferentes ($p>0,05$). Os proteoglicanos, quantificados com azul de alcian, apresentaram pouca diferença entre os tipos de agarose e concentração, sem diferença significativa com os grupos controle.

A análise de remodelamento da matriz extracelular mostrou que todos os tecidos expressaram remodelação, entretanto, biomateriais de FA com agarose LM tiveram maior expressão em comparação com o grupo controle. A imunohistoquímica também mostrou que todos os tecidos tinham ambos macrófagos, células de defesa do organismo, quando comparadas com o grupo controle e F-0 não sendo significativas em todos os casos.

Os resultados obtidos mostram o potencial promissor que FA tem para geração de tecidos e órgãos. A possibilidade de criação de diferentes hidrogéis, com diferentes agentes e concentrações pode expandir o potencial clínico, como demonstrado anteriormente. Abrindo assim novas oportunidades para pesquisas futuras na engenharia de tecidos e medicina regenerativa.

Conclusões

O polissacarídeo de agarose marinha pode melhorar as propriedades biomecânicas de hidrogéis de fibrina, resultando em biomateriais de FA altamente compatíveis em *ex vivo* e *in vivo*. Os achados sugerem que os biomateriais FA conduzem o processo regenerativo através de uma forte resposta inflamatória. A possibilidade de customização das propriedades biomecânicas permite maior abrangência na geração de tecidos, trazendo resultados promissores.

Os resultados sustentam o potencial do uso de biomateriais em aplicações de regeneração de tecidos, com a possibilidade de criar tecidos com comportamentos específicos a depender da demanda. A agarose é uma candidata promissora para usos clínicos futuros.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

À Liga Acadêmica de Bioengenharia (LABIOENG), agradeço pelo incentivo contínuo, apoio técnico e troca de conhecimentos ao longo da construção deste QuiArtigo.

Notas e referências

- 1 Y. Zhao, X. Shen, R. Ma, Y. Hou, Y. Qian, C. Fan, Biological and Biocompatible Characteristics of Fullerenols Nanomaterials for Tissue Engineering, *Histol. Histopathol.*, 2021, **36**, 725–731.
- 2 F. Mokhtari-Jafari, G. Amoabediny, M. M. Dehghan, Role of Biomechanics in Vascularization of Tissue-Engineered Bones, *J. Biomech.* 2020, **110**, 109920.
- 3 M. A. Salati, J. Khazai, A. M. Tahmuri, A. Samadi, A. Taghizadeh, M. Taghizadeh, P. Zarrintaj, J. D. Ramsey, S. Habibzadeh, F. Seidi, M. R. Saeb, M. Mozafari, Agarose-Based Biomaterials: Opportunities and Challenges in Cartilage Tissue Engineering, *Polymers*, 2020, **12**, 1150,
- 4 M. Alaminos M, M. D. C. Sánchez-Quevedo, J. I. Muñoz-Avila, D. Serrano, D. Medialdea, I. Carreras, A. Campos, Construction of a Complete Rabbit Cornea Substitute Using a Fibrin-Agarose Scaffold, *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2006, **47**, 3311–3317,
- 5 O. Ortiz-Arrabal, A. I. Lorenzo, F. Campos, M. A. Martín-Piedra, I. Garzón, P. A. Fernandes, M. J. Frutos, E. Esteban, J. Fernández, A. Janer, A. Campos, J. C. Astrain, M. Alaminos, Fibrin and Marine-Derived Agaroses for the Generation of Human Bioartificial Tissues: An Ex Vivo and In Vivo Study, *Mar Drugs*, 2023, **3**, 187.

DO CAMPO À INOVAÇÃO VERDE - A TRAJETÓRIA DO LMCERVA

“Em um mundo onde a ciência se entrelaça com o cotidiano, a história do Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis (LMCerva), da Universidade de Brasília (UnB), é um brinde à inovação e à paixão pela química. Nossa jornada começou em 2012, com a criação do Laboratório de Bioprocessos Cervejeiros e Catálise em Energias Renováveis (Labccerva) pela Profa. Grace Ferreira Ghesti.

Naquele mesmo ano, a oferta da disciplina "Fundamentos de Produção de Cerveja" se tornou um fenômeno na UnB, rapidamente se tornando a mais concorrida. Por meio dela e de nossas pesquisas, formamos uma nova geração de cervejeiros, contribuindo ativamente para o vibrante cenário cervejeiro local e prestando serviços essenciais às cervejarias da região.

A evolução do Labccerva atingiu um novo patamar em 2021, quando nos unimos ao Laboratório de Materiais e Combustíveis, uma fusão que deu origem ao atual LMCerva. A colaboração entre a Profa. Grace Ghesti, o Prof. Paulo Suarez (IQ) e a Profa. Talita Carmo (IB) expandiu nosso horizonte, combinando a paixão por bioprocessos com a expertise em materiais e combustíveis.

Essa sinergia resultou em inovações que transcendem o acadêmico. Um dos nossos maiores orgulhos é o desenvolvimento da cerveja acidificada com pólen, uma tecnologia pioneira transferida para a cervejaria Bracitorium, intitulada “Turma da Colina”. Essa bebida única, que funde a ciência com a natureza, hoje é comercializada em Brasília e no seu entorno, levando um pedacinho de nossa pesquisa diretamente ao consumidor.

Não paramos por aí. Nosso espírito inovador também se manifestou na criação da cachaça 5 madeiras e de um gin sem álcool, produtos que demonstram nossa versatilidade e capacidade de atender às novas demandas do mercado. Ambas as tecnologias foram transferidas para a Ghesti Brewing Co., uma spin-off da própria UnB, evidenciando o ciclo completo de pesquisa, desenvolvimento e transferência de tecnologia.

A história do LMCerva é um testemunho do poder da colaboração e da aplicação prática do conhecimento. Mostramos que a química não vive apenas nos livros, mas pode ser saboreada em uma cerveja inovadora, em uma cachaça complexa ou em um gin que desafia o tradicional. Nosso laboratório continua a ser um ponto de encontro entre a academia e a indústria, transformando ideias em produtos e, acima de tudo, inspirando futuras gerações de cientistas. Agradecemos a todos que fazem parte desta jornada e convidamos a comunidade a continuar brindando conosco à ciência e à inovação.”



Projetos LMCerva

Ciência em soluções concretas e de alto valor agregado

POR:

Julia Saemi F. Yasuda,^{a*} Vitória Domenick G. R. M. Trovão,^{a*} Déborah Santos de Moraes,^{a*} Munique Gonçalves Guimarães,^{a*} Grace Ferreira Ghesti^{b*} e Paulo A. Z. Suarez^{b*}

The Laboratory of Bioprocesses, Materials and Fuels (LMCerva) at the University of Brasília is a hub for research, innovation, and extension in sustainability and applied chemistry. Formed in 2021 by merging the Materials and Fuels Laboratory (LMC, 1999) and the Laboratory of Brewing Bioprocesses (LaBCCerVa, 2013), it broadened its scope from catalysis and bioenergy to brewing science, focusing on developing innovative technologies for Brazil's Central-West region. Key achievements include innovative technologies, patents, trademarks, training of students, and national and international collaborations. LMCerva integrates teaching, research, and technology transfer, significantly impacting renewable energy, waste valorization, and the craft beer production chain. By combining scientific innovation with societal needs, the lab advances the bioeconomy, establishing itself as a national reference in science and sustainability.

O Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis (LMCerva) da Universidade de Brasília consolida-se como núcleo de pesquisa, inovação e extensão em sustentabilidade e química aplicada. Resultante da fusão em 2021 do LMC (1999) e do LaBCCerVa (2013), o laboratório expandiu sua atuação da catálise e bioenergia para a ciência cervejeira, com foco no desenvolvimento de tecnologias inovadoras para o Centro-Oeste. Seus resultados incluem o desenvolvimento de tecnologias, registro de patentes e marcas, formação de recursos humanos e colaborações nacionais e internacionais. A atuação integra ensino, pesquisa e transferência de tecnologia, impactando áreas como energias renováveis, valorização de resíduos e fortalecimento da cadeia produtiva da cerveja artesanal. Ao articular inovação científica e demandas sociais, o LMCerva contribui para a bioeconomia, posicionando-se como referência nacional em ciência e sustentabilidade.

^a Universidade de Brasília, Instituto de Química, Campus Darcy Ribeiro, CEP 70910900, Brasília-DF, Brasil

^b Universidade de Brasília (UnB), Instituto de Química, Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis, Brasília-DF, Brasil

* E-mail: labccerva@gmail.com

Palavras-chave: sustentabilidade; química aplicada; bioprocessos; energias renováveis; valorização de resíduos

Introdução

O avanço da ciência e da tecnologia tem sido fundamental para enfrentar os desafios do século XXI, que incluem a busca por fontes energéticas renováveis, a valorização de resíduos e o desenvolvimento de processos produtivos mais sustentáveis. No Brasil, país que combina riqueza em recursos naturais e tradição em biocombustíveis, a universidade pública ocupa papel estratégico nesse processo ao articular pesquisa, inovação e extensão. A consolidação de laboratórios de pesquisa é parte essencial dessa missão, pois permite tanto a formação de recursos humanos qualificados quanto a transferência de conhecimento para a sociedade e o setor produtivo.

A matriz energética brasileira se diferencia pela forte participação de fontes renováveis. Desde a criação do Programa Nacional do Álcool, na década de 1970, até a introdução obrigatória do biodiesel no início dos anos 2000, o país investiu em rotas alternativas ao petróleo. Esse movimento exigiu uma base científica sólida para viabilizar novas tecnologias, avaliar impactos e propor soluções. Este

movimento exigiu uma base científica sólida, levando à criação do Laboratório de Materiais e Combustíveis (LMC) em 1999. Em 2013, foi fundado o Laboratório de Bioprocessos Cervejeiros e Catálise Aplicada a Energias Renováveis (LaBCCerVa). Em 2021, estes dois laboratórios uniram-se para formar o LMCerva (Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis), com o objetivo de potencializar o desenvolvimento de tecnologias e produtos inovadores, com foco especial nas demandas e potencialidades da região Centro-Oeste do Brasil.

Ainda, como LMC, um laboratório multidisciplinar, sempre desenvolveu diversas tecnologias que estão já transferidas para o mercado e sendo comercializadas. Apresenta grande experiência no desenvolvimento de processos catalíticos, incluindo a síntese, caracterização e aplicação de catalisadores nas mais diversas transformações químicas. Especificamente na área de materiais e combustíveis, vem atuando no desenvolvimento de metodologias para a determinação qualidade de álcool, gasolina, diesel e biodiesel, processos de transesterificação e craqueamento de óleos e gorduras, e catalisadores para a

polimerização de derivados de biomassa. Além disso, deve-se destacar que o coordenador foi premiado pela UNESCO com o PRÊMIO MERCOSUL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA 2004, tema ENERGIA, na categoria JOVEM PESQUISADOR e o Prêmio Pesquisador em Catálise 2007, outorgado pela Petrobrás e Sociedade Brasileira de Catálise, ambos pelos seus trabalhos em biocombustíveis, além de ter sido recentemente recebido o título de Comendador da Ordem Nacional do Mérito Científico e membro afiliado da Academia Brasileira de Ciências.

Fruto dessa união, o LMCerva ampliou seu escopo de atuação e passou a explorar, com um olhar mais tecnológico, setores emergentes no Brasil, notadamente a cadeia produtiva da cerveja, sempre com o intuito de gerar inovação para o Centro-Oeste e para o país. O estado se consolidou como o terceiro maior produtor mundial, e o crescimento das microcervejarias artesanais abriu espaço para a inovação em insumos e processos. Nesse contexto, o grupo rapidamente se tornou referência nacional na interface entre ciência, tecnologia, biocombustíveis e mercado cervejeiro.

Entre as contribuições dessa linha destacam-se o estudo e processamento de cevada e lúpulo cultivados no Cerrado, a caracterização de compostos voláteis em cervejas maturadas em madeiras brasileiras, a avaliação de fraudes e controle de qualidade e a oferta de cursos e capacitações que aproximam a academia do setor produtivo. Essas iniciativas revelam a capacidade do LMCerva de atuar de forma interdisciplinar, conectando bioenergia e ciência da cerveja em um mesmo espaço de pesquisa, ensino e extensão.

Assim, a trajetória do laboratório evidencia como a universidade pode contribuir de forma concreta para a formação de profissionais, para o avanço científico e para o fortalecimento de setores estratégicos da economia. Ao unir sustentabilidade, inovação em energias renováveis e valorização da produção cervejeira nacional, o LMCERVA se consolidou como um exemplo de integração entre ciência de ponta e demandas sociais e produtivas do país.

Metodologia

A elaboração deste estudo baseou-se na análise documental de registros institucionais, memorial acadêmico e publicações científicas da fundadora e colaboradores, bem como em relatos históricos de alunos e parceiros de pesquisa. Trata-se, portanto, de uma reconstrução histórico-descritiva com caráter qualitativo.

A metodologia de pesquisa adotada foi a exploratória (DANE, 1990). Os métodos que relacionam as diversas estruturas de extensão e programas de pesquisa de uma Universidade pública. O estudo buscou aprofundar o Projeto de extensão LaBCCerVa do Instituto de Química, assim como o Laboratório de Materiais e Combustíveis da Universidade de Brasília. Todo o desdobramento das ações geradas pelo projeto foram acompanhadas pelos autores do artigo. Os elementos de pesquisa documental buscaram compreender o contexto do processo de interação da Universidade, Estado, Comunidade, Setor Produtivo e Meio Ambiente de forma a configurá-lo.

Resultados e discussão

Fundação e Primeiros Passos

O LaBCCerVa, criado em 2013, consolidou-se como um espaço multidisciplinar voltado à sustentabilidade, bioprocessos e propriedade intelectual. Desde então, tem desenvolvido tecnologias, promovido transferência de conhecimento, impulsionado a criação de spin-offs e oferecido soluções para desafios ambientais. Com a expansão do setor cervejeiro em Brasília, o laboratório passou também a atuar na capacitação de cervejeiros, organizando cursos, palestras e oficinas voltadas ao aprimoramento técnico.

Em 2016, para fortalecer e validar essas iniciativas, foi lançado o projeto de extensão do laboratório. Essa ação não apenas ampliou o alcance das atividades, como também reforçou o compromisso com a difusão do conhecimento científico e tecnológico, integrando comunidade acadêmica, sociedade civil e setor produtivo. Como ilustrado na Figura 1, a atuação do LaBCCerVa estrutura-se a partir da lógica da quíntupla hélice, na qual diferentes áreas de conhecimento e atores sociais se conectam, favorecendo a formação de profissionais mais preparados para enfrentar os desafios ambientais e atender às demandas do setor produtivo.

Figura 01. Quíntupla hélice relacionada a atuação do LaBCCerVa. Fonte: autores



Paralelamente, o LMC, sob a coordenação ou participação do Prof. Paulo Anselmo Ziani Suarez, concentrou suas atividades em linhas de pesquisa de grande relevância para a sustentabilidade e a indústria química e energética. Entre essas linhas, destaca-se a Catálise e Oleoquímica, que constitui um dos principais eixos de pesquisa, servindo como pilar central para os projetos desenvolvidos no Laboratório. Na área de Biocombustíveis e Energias Renováveis, o grupo atua no desenvolvimento de tecnologias voltadas à produção de biodiesel, ao aproveitamento de subprodutos de processos de gaseificação de biomassa, à conversão de biomassa e à valorização de resíduos agroindustriais. Outra frente de atuação importante envolve o Desenvolvimento de Processos e Técnicas, abrangendo a conversão de óleos e gorduras vegetais e animais em combustíveis e óleos combustíveis, bem como a criação de sistemas catalíticos. Entre os resultados alcançados, destacam-se os sistemas catalíticos para esterificação de ácidos graxos, os processos de transesterificação de óleos e o desenvolvimento de sistemas para análise, certificação e monitoramento da qualidade de combustíveis.

Com um forte direcionamento para a aplicação prática e a transferência de tecnologia, a missão do Laboratório sempre foi gerar soluções que transitem do conhecimento básico à inovação aplicada. Nesse contexto, sobressaem-se as iniciativas de Inovação e Patentes, evidenciadas pela variedade de processos e técnicas desenvolvidas, como o “Processo de Polimerização Térmica de Óleos e Gorduras” e o “Sistema de Conversão de Óleos Vegetais, Óleos Usados e Gorduras Animais em Óleos Combustíveis”, que atestam o caráter inovador e o compromisso com a geração de propriedade intelectual do grupo. Além disso, o Laboratório tem se destacado pela Transferência de Conhecimento, demonstrando sua capacidade de transformar pesquisa em soluções práticas e

empreendimentos tecnológicos. Um exemplo notório é a criação de uma startup originada a partir de ideias desenvolvidas no LMC, dedicada à produção de testes rápidos para detecção de metanol em combustíveis, cosméticos e bebidas alcoólicas, uma inovação de grande impacto para a saúde pública e a segurança alimentar.

Desde sua origem, o laboratório foi concebido não apenas como um centro de pesquisa, mas como um espaço de formação de recursos humanos comprometido em articular ciência, inovação e demandas sociais, consolidando-se como elo estratégico entre academia, setor produtivo e comunidade.

Já o LaBCCerVa, ao longo dos anos, o laboratório consolidou suas atividades em três linhas principais de investigação, orientadas para a inovação tecnológica e a sustentabilidade:

Tecnologia Cervejeira e Malteira

Esta linha dedica-se ao aproveitamento de insumos regionais do Cerrado brasileiro para a produção cervejeira, gerando impactos positivos em múltiplos níveis: valoriza agricultores locais, oferece às cervejarias opções para o desenvolvimento de produtos com perfis sensoriais distintivos e contribui com avanços científicos. Entre seus projetos destacam-se a produção de malte a partir de cevada cultivada no Cerrado, a elaboração de cervejas com adjuntos regionais como trigo sarraceno, milho e arroz, a incorporação de lúpulo nacional em formulações cervejeiras, a maturação de cervejas em madeiras nativas do bioma, o desenvolvimento de estratégias de reaproveitamento e tratamento de resíduos do processo cervejeiro e o controle oficial de fraudes em cerveja no Brasil.

A colaboração com a área de pesquisa em produção cervejeira revelou-se extremamente frutífera, resultando na publicação de um conjunto de obras de referência para o setor. O carro-chefe dessa iniciativa é o livro “Cevada e Malteação”, publicado pela Appris Editora. Esta obra é fundamental, pois aborda com detalhe técnico e científico todos os aspectos fundamentais e tecnológicos do processo crítico de malteação, desde o grão até o malte pronto para a brassagem.

No entanto, a contribuição não se limitou a este título. A coleção se expande para cobrir toda a cadeia de valor, com o livro “MALTE: essência da cerveja”, que aprofunda o entendimento sobre este ingrediente vital. Adicionalmente, a publicação de “Análise Sensorial para Cervejas” supre uma demanda importante, oferecendo um guia metodológico

rigoroso para a avaliação e caracterização organoléptica do produto final. Por fim, o título "Caracterização e aplicação de biomassa em tecnologias de conversão termoquímica" projeta a pesquisa para além da bebida, explorando a sustentabilidade e a economia circular no aproveitamento de subprodutos da indústria cervejeira.

Figura 02. Capas dos livros publicados. Fonte: Autoral.



Catálise Ambiental e Bioenergia

Com foco na sustentabilidade industrial, esta frente investiga a aplicação de catalisadores heterogêneos para desenvolver processos mais limpos e eficientes. Os estudos concentram-se na criação de rotas tecnológicas ambientalmente responsáveis, com aplicações na produção de biocombustíveis, na geração de energia e na valorização de resíduos. As investigações incluem a identificação de novas fontes de biocombustíveis, o uso da catálise heterogênea para produção de bioenergia, a aplicação de processos termoquímicos como pirólise e gaseificação e o desenvolvimento de biomateriais a partir de resíduos agroindustriais.

Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia

Esta linha assegura que as inovações geradas no laboratório possam alcançar o setor produtivo. Nela são estudados mecanismos de proteção legal, como patentes e marcas, além da realização de prospecções e mapeamentos

tecnológicos que facilitam a transferência de conhecimento para a sociedade. As atividades principais envolvem assessoria em propriedade intelectual, prospecção tecnológica e estruturação de processos de transferência de tecnologia.

Como resultado dessa abordagem, um kit colorimétrico para detecção de metanol, desenvolvido no LMCerva para uso em combustíveis, bebidas alcoólicas e cosméticos, teve sua tecnologia transferida para um spin-off da UnB. Originária do laboratório por meio de alunos do Professor Doutor Paulo Anselmo, a empresa representa a efetiva aplicação das atividades de transferência de tecnologia e propriedade intelectual.

Figura 03. Kit de análise colorimétrica para detecção de metanol em bebidas, exibido com a "Cachaça 5 Madeiras Brasileiras" da Ghesti Brewing Co., produto que obteve resultado negativo para o contaminante. Fonte: Autoral.



Um outro exemplo de transferência de tecnologia foi o desenvolvimento do know-how "Microorganismos alternativos para produzir bebida de fermentação bioquímica" pela UnB, transferido para a cervejaria Bracitorium. O resultado foi a cerveja "Turma da Colina", uma cerveja do tipo Catharina Sour, acidificada com pólen de abelha e uso de seriguela.

Figura 04. Fotografia da cerveja “Turma da Colina”. Fonte: Autoral.



Pesquisa e extensão

O LMCerva coordena atualmente dois projetos de extensão que refletem sua diversidade de atuação e compromisso com a inovação para o Centro-Oeste. O primeiro é direcionado à capacitação e fortalecimento do setor cervejeiro, segmento em constante expansão na região. Já o segundo concentra-se no desenvolvimento de tecnologias para a geração de energia limpa e sustentável, buscando aliar preservação ambiental à valorização de resíduos agroindustriais, transformando-os em materiais e produtos de maior valor agregado. Ambos os projetos incluem ainda atividades de consultoria e capacitação técnica, fundamentais para o aperfeiçoamento e escalonamento de processos inovadores no Distrito Federal.

A atuação do laboratório não se restringe a esses projetos. O LMCerva também participa do programa Biogama e idealizou iniciativas de grande impacto, como o Pré-Química da Universidade de Brasília, voltado ao nivelamento de estudantes ingressantes em Engenharia. Além disso, desenvolveu materiais didáticos e metodologias específicas para disciplinas estratégicas, como Combustíveis e Biocombustíveis e Desenvolvimento de Habilidades no Trabalho de Laboratório de Química. Essas experiências contaram com o envolvimento de bolsistas REUNI, tanto da graduação quanto da pós-graduação, fortalecendo a integração entre ensino, pesquisa e extensão e ampliando o alcance das ações do laboratório.

O impacto das atividades do LMCerva ultrapassa o ambiente acadêmico, alcançando a sociedade por meio de

pesquisas aplicadas em sustentabilidade e energias renováveis. Essa trajetória tem contribuído para consolidar a Universidade de Brasília no cenário nacional e internacional da química aplicada, reforçando sua inserção em redes de inovação e transferência tecnológica.

Nesse contexto, destacam-se também outras iniciativas ligadas ao laboratório, como a Liga Acadêmica de Bioengenharia (LABIOENG), que promove formação complementar e engajamento estudantil, e a infraestrutura digital, representada pelo site institucional desenvolvido e mantido pelos integrantes do LMCerva/IQ-UnB desde 2023.

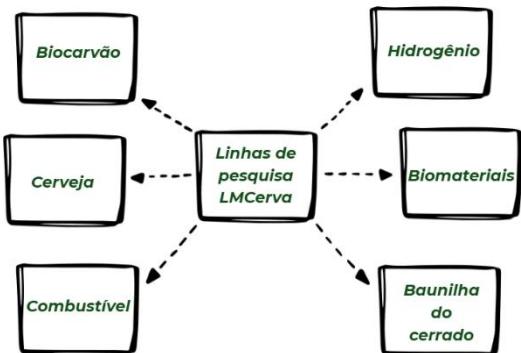
Essa ampla rede de projetos, parcerias e ferramentas digitais evidencia a capacidade do LaBCCERva de atuar de forma multidisciplinar, conectando produção acadêmica, aplicação prática e transferência de conhecimento para o setor produtivo, consolidando-se como referência em inovação e sustentabilidade.

Integração das Linhas de Pesquisa

Os projetos em andamento no LMCerva representam a materialização de suas linhas de pesquisa fundamentais (Tecnologia Cervejeira, Catálise Ambiental, Bioenergia e Transferência de Tecnologia) e exemplificam a aplicação prática do modelo de quíntupla hélice que norteia sua atuação. A iniciativa central que unifica esses esforços são:

Centro de Processamento de Insumos, concebido para "transformar resíduos em soluções sustentáveis para a agricultura e a indústria". Este centro funciona como um hub de biorrefinaria, onde o conhecimento científico acumulado em catálise e bioprocessos é aplicado para agregar valor a biomassas residuais, gerando um ciclo virtuoso de inovação, sustentabilidade e desenvolvimento econômico.

Figura 05. Fluxograma das pesquisas desenvolvidas no LMCerva. Fonte: Autoral.



No âmbito da Catálise Ambiental e Bioenergia, o foco principal do centro é a valorização integral de resíduos agroindustriais. Um caso de estudo aprofundado é o do coco verde, cujo processamento foi planejado para atingir o descarte zero. A pesquisa desenvolve métodos eficientes para a separação e tratamento de todos os seus subprodutos, como casca, fibra, pó e água residual, visando a elaboração de biofertilizantes, compostos orgânicos e substratos de alto desempenho. A fibra de coco, por exemplo, é convertida em produtos de maior valor agregado, como vasos e mantas para jardinagem, explorando suas propriedades intrínsecas — leveza, porosidade e resistência à decomposição — que permitem a retenção de água e a aeração ideal para as raízes das plantas. Essa abordagem se estende a uma ampla gama de biomassas, incluindo bagaço de malte, cascas de uva e baru, caroço de queijo, palha de milho e resíduos de banana.

A partir dessas biomassas, o LMCerva desenvolve produtos tecnologicamente avançados. O biocarvão, por exemplo, é projetado para ser um material multifuncional, servindo não apenas como corretor de acidez do solo e fertilizante, mas também como um agente de sequestro de carbono (CO₂) e como barreira contra incêndios.

Na frente de biomateriais, a pesquisa foca na criação de embalagens de alimentos e filmes protetores para frutos. A caracterização físico-química desses novos materiais é rigorosamente executada utilizando a infraestrutura analítica robusta do laboratório, que inclui técnicas como Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC), Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (GC-MS), Espectrometria de Infravermelho (IV-ATR) e Difração de Raios X (DRX).

Figura 06. Fotografias de biofilmes (produtos) sintetizados no laboratório. Fonte: Autoral.



A intersecção entre a Tecnologia Cervejeira (em seu sentido amplo, de processos fermentativos e sensoriais) e a Transferência de Tecnologia é claramente visível no projeto da Baunilha do Cerrado. O trabalho do laboratório vai além do campo agronômico de aprimorar a polinização e a cura das favas; ele se completa ao transferir esse conhecimento para o setor produtivo. Um resultado direto dessa pesquisa é a "Cachaça envelhecida com favas de baunilha do Cerrado", um destilado que utiliza tecnologia de torra desenvolvida no LMCerva para aprimorar o perfil sensorial e que foi premiado com medalha de prata na Copa Brasil Spirit de 2024. Este é um exemplo tangível de como o conhecimento gerado na universidade é protegido e licenciado, resultando em um produto inovador no mercado e cumprindo a missão do laboratório de atuar como ponte entre a academia e a sociedade.

Figura 07. Fotografia do laboratório LMCerva. Fonte: Autoral.



GHESTI BREWING CO LTDA

Spin-off originária da Universidade de Brasília, dedicada à criação de bebidas que valorizam os ingredientes únicos do Cerrado brasileiro. Desenvolvida por meio de um acordo de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) entre o laboratório LMCerva/UnB e a empresa Ghesti Brewing CO. LTDA.

O Mystic Ghesti Gin é um marco na parceria entre o Laboratório LMCerva e a Ghesti Brewing CO LTDA, personificando a inovação e a excelência. Este gin, desenvolvido por meio da transferência de tecnologia da UnB para a empresa, rapidamente ganhou destaque no mercado ao ser premiado pelo renomado Brazil Spirits Cup. O reconhecimento não apenas valida a qualidade superior do produto, mas também demonstra a aceitação e o potencial comercial que surgem quando a ciência de ponta se une à expertise em produção.

Figura 08. Mystic Ghesti Gin. Fonte: Autoral.



Fruto do conhecimento científico gerado no LMCerva, a Cachaça 5 Madeiras Brasileiras foi desenvolvida aplicando métodos otimizados de torrefação de madeiras nativas para a maturação de etanol potável. Esta tecnologia, transferida para a Ghesti Brewing, resultou em uma bebida com complexidade aromática e singularidade, que conquistou uma medalha de prata no tradicional Festival da Cachaça de Olhos D'água. O produto é um testemunho do potencial de agregar valor a produtos tradicionais através de pesquisa e desenvolvimento.

Figura 09. Cachaça 5 Madeiras Brasileiras. Fonte: Autoral.



Representando uma fronteira inovadora no mercado de bebidas, o Ghesti Gin sem Álcool foi meticulosamente desenvolvido pela parceria UnB e Ghesti Brewing Co. através da técnica de hidrodestilação. Este processo garante um perfil de sabor único e especial, ideal para a criação de drinks

sofisticados sem álcool, mas que mantêm as características sensoriais distintivas de um gin, incluindo nuances do terroir do cerrado. É a prova de que a tecnologia pode expandir horizontes e atender a novos nichos de consumo com qualidade excepcional.

Figura 10. Ghesti Gin sem Álcool. Fonte: Autoral.



A Cachaça com Baunilha-do-Cerrado é um produto que celebra a riqueza da biodiversidade brasileira, desenvolvido integralmente através do acordo de PD&I entre a universidade e a empresa. Ao incorporar a baunilha-do-cerrado, um ingrediente genuíno e valioso do bioma, a bebida agrupa sabores e aromas exclusivos, promovendo a valorização do patrimônio natural. Este projeto exemplifica perfeitamente a missão da parceria: unir ciência e empreendedorismo para criar produtos que são, ao mesmo tempo, premium e afetivamente ligados às nossas raízes.

Figura 11. Cachaça com Baunilha-do-Cerrado. Fonte: Autoral.



Conclusões

O percurso do LMC (1999), LaBCCERva (2013) e sua fusão no LMCerva (2021) mostra que um laboratório universitário pode ir muito além do trabalho de bancada. Ao combinar investigação, ensino e extensão, o grupo tem cumprido seu objetivo de desenvolver tecnologias e produtos inovadores para o Centro-Oeste, gerando soluções aplicáveis, capacitando profissionais e fomentando vínculos com a indústria e a comunidade. Essa atuação integrada tem permitido transformar resíduos e insumos regionais em produtos de valor, além de promover rotas tecnológicas orientadas à sustentabilidade energética.

A proteção da propriedade intelectual, as parcerias estabelecidas e os projetos de extensão consolidam o papel do laboratório como agente de transferência de conhecimento. A interação com diferentes atores — acadêmicos, empresariais e governamentais — ampliou o alcance das atividades e contribuiu para posicionar a Universidade de Brasília como referência nas áreas abordadas.

Mais do que resultados pontuais, o legado do LaBCCERva/LMCerva reside na formação de pessoas e na construção de tecnologias com impacto social e ambiental. Mantendo essa trajetória de inovação colaborativa, o laboratório está bem colocado para enfrentar desafios futuros e seguir contribuindo para a sustentabilidade e o desenvolvimento científico-regionais.

Desafios e Perspectivas Futuras

O LMCerva, ao longo de sua trajetória, consolidou-se como espaço de inovação e formação, mas enfrenta desafios que exigem constante atenção. Entre eles estão a necessidade de manter uma infraestrutura atualizada, a busca contínua por financiamento para sustentar projetos de médio e longo prazo e a capacidade de acompanhar as rápidas mudanças tecnológicas que impactam diretamente os rumos da ciência aplicada.

Outro ponto relevante é a ampliação da interação com a sociedade e com o setor produtivo. Para que as soluções desenvolvidas cheguem de fato ao mercado e gerem benefícios sociais, é essencial fortalecer parcerias, difundir os resultados e criar mecanismos de transferência de tecnologia mais ágeis. Nesse sentido, a visibilidade institucional também se torna um desafio, demandando maior presença em meios digitais e estratégias de divulgação científica que aproximem o laboratório de diferentes públicos.

No horizonte, destacam-se perspectivas ligadas à bioeconomia, à economia circular e ao desenvolvimento de novos materiais e tecnologias voltadas para a descarbonização. O fortalecimento de redes de colaboração nacionais e internacionais deve ampliar o alcance das pesquisas, ao mesmo tempo em que a formação de novos profissionais continuará sendo um dos pilares do laboratório. Assim, o LMCerva reafirma sua vocação de atuar de forma integrada, unindo ciência, inovação e compromisso social.

Divulgação científica e engajamento digital

Para ampliar o alcance de suas atividades e democratizar o acesso ao conhecimento, o Laboratório de Materiais e Combustíveis implementa uma estratégia ativa de divulgação científica em diversas plataformas digitais. A presença online foi consolidada sob a marca "LMCerva", refletindo sua identidade atual, e visa traduzir a complexidade da pesquisa em conteúdos acessíveis para públicos variados, da comunidade acadêmica à sociedade em geral.

O site oficial do laboratório (disponível em <https://sites.google.com/view/labccerva>) serve como o hub central de informações. Apesar de manter o domínio com a nomenclatura histórica "labccerva", o sítio eletrônico é mantido integralmente atualizado, funcionando como um repositório dinâmico de notícias, portfólios de projetos, produções bibliográficas e os mais recentes avanços da pesquisa.

Figura 12. Página atualizada do site oficial do LMCerva

(<https://sites.google.com/view/labccerva>), exibindo sua identidade visual consolidada e informações recentes. Fonte: Autoral.



O engajamento com o público é potencializado através de redes sociais de alto alcance. No Instagram e no TikTok (ambos sob o perfil @lmcerva), o laboratório adota uma linguagem ágil e visual, utilizando-se de formatos como reels e shorts para divulgar experimentos, behind-the-scenes do cotidiano da pesquisa e explicações didáticas sobre suas linhas de investigação.

Figura 13. Identidade visual unificada nos perfis oficiais do LMCerva no Instagram e TikTok. Fonte: Autoral.



Para conectar-se com o setor produtivo, pares da academia e potenciais colaboradores, o perfil no LinkedIn ("LMCerva Laboratório UnB") é utilizado para a divulgação de achievements institucionais, artigos científicos, oportunidades e para destacar a expertise do grupo em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia.

Figura 14. Perfil institucional "LMCerva Laboratório UnB" no LinkedIn, refletindo a identidade visual do laboratório e sua estratégia de comunicação profissional. Fonte: Autoral.



Complementarmente, o canal no YouTube (identificado como "LMCerva") armazena um acervo de conteúdo em profundidade, incluindo palestras, tutoriais de equipamentos, coberturas de eventos e entrevistas com pesquisadores, aprofundando-se nos temas que as demais plataformas sinalizam.

Figura 15. Interface do canal "LMCerva" no YouTube, exibindo a identidade visual consolidada do laboratório. Fonte: Autoral.



Esta abordagem multiplataforma permite que o LMCerva não apenas cumpra seu papel social na divulgação científica, mas também construa uma identidade digital robusta, atraia novos talentos e fortaleça os elos entre a universidade, a indústria e a sociedade.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade de Brasília (UnB), em especial ao Instituto de Química (IQ), por todo o apoio institucional e infraestrutura fornecida para a consolidação do LMCerva. Agradecemos profundamente a todos os alunos de graduação, mestres, doutores e bolsistas (incluindo REUNI) que, ao longo dos anos, dedicaram seu talento e esforço à construção da história do laboratório. Estendemos nossos agradecimentos às agências de fomento (ex: CNPq, CAPES, FAPDF) pelo financiamento essencial aos projetos e bolsas. Por fim, agradecemos aos nossos valiosos parceiros do setor produtivo e da sociedade, com destaque para a Ghesti Brewing CO. LTDA e a Cervejaria Bracitorium, pelas colaborações de sucesso em pesquisa, desenvolvimento e inovação.

Referências

- 1 LMCerva, Canal do Laboratório de Metodologias para a Química Cervejeira da Universidade de Brasília, YouTube, 2025, <https://www.youtube.com/@LMCerva>
- 2 LabCerva, Laboratório de Metodologias para a Química Cervejeira da Universidade de Brasília, Google Sites, 2025, <https://sites.google.com/view/labccerva>

- 3 G1, Pesquisadores da UnB criam cerveja com pólen de abelha e seriguela; você provaria?, G1 — Distrito Federal, 3 Apr. 2024, <https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/2024/04/03/pesquisadores-da-unb-criam-cerveja-com-polen-de-abelha-e-seriguela-voce-provaria.ghtml>
- 4 LMCerva, Perfil institucional do Laboratório de Metodologias para a Química Cervejeira da Universidade de Brasília, LinkedIn, 2025, <https://www.linkedin.com/in/lmcerva-laboratorio-unb-538141388>
- 5 LMCerva, Perfil institucional do Laboratório de Metodologias para a Química Cervejeira da Universidade de Brasília, Instagram, 2025, <https://www.instagram.com/lmcerva>
- 6 LMCerva, Perfil institucional do Laboratório de Metodologias para a Química Cervejeira da Universidade de Brasília, TikTok, 2025, <https://www.tiktok.com/@lmcerva>
- 7 I. V. P. Yoshida, L. H. Andrade, C. R. Mendonça, C. R. T. Tarley, E. R. Leite, J. D. Figueroa-Villar, M. J. Politi, M. A. P. Silva, P. C. Isolani and R. S. Freire, Desafios e oportunidades da pesquisa em química no Brasil, *Química Nova*, 2023, 46, 786–791,
- 8 GHE STI Brewing Co, GHESTI Brewing Co. – Brasil, Website, 2025, <https://ghestibrewingco.com.br>
- 9 T. M. Machado, A. Santiago, J. A. M. de Santana, T. C. da S. Cruz e G. F. Ghesti, PEER REVIEW, 2024, 6, DOI: 10.53660/PRW-2109-3907.
- 10 I. O. Cenci, E. T. Slomp, L. G. S. Pinheiro and G. F. Ghesti, *Cevada e Malteação*, Editora Appris, Curitiba, 2021.
- 11 G. Ghesti, C. Barros, C. Muller, N. Parachin and L. Pinheiro, *Análise Sensorial Para Cervejas*, 2018.
- 12 G. Ghesti and C. Barros, *Malte: essência da cerveja*, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

Análise sobre métodos de produção modernos para obtenção de cervejas sem álcool

DOI: 10.5281/zenodo.17506967

Arthur A. Nascimento,^a Gabriel M. T. da Silva,^a Vitória Domenick G. R. M. Trovão,^a Lethífany O. Nascimento,^a Julia Saemi F. Yasuda,^a Mariana M. Moutinho^b e Grace F. Ghesti^{b*}

The growing demand for non-alcoholic beer, driven by healthier lifestyle choices, presents a significant industry challenge. A key issue is the lack of organoleptic acceptance, as many of these products fail to replicate the flavor and aroma of their traditional counterparts. To overcome this, food engineering is focused on developing methods for selective alcohol removal. Techniques like membrane separation and the use of non-*Saccharomyces* yeast are crucial for preserving key volatile compounds. The goal is to produce a high-quality alternative that meets consumer sensory expectations and expands the market.

A demanda por bebidas não alcoólicas, como a cerveja, teve um aumento significativo nos últimos anos, impulsionado principalmente por uma mudança de paradigma em direção a estilos de vida mais saudáveis. Apesar desse crescimento na popularidade, um grande problema permanece no mercado, pois muitos produtos não alcoólicos não são organolepticamente aceitos pelos consumidores. Eles frequentemente exibem uma falta perceptível de sabor e aroma quando comparados às suas contrapartes alcoólicas tradicionais. Consequentemente, tornou-se imperativo para a indústria desenvolver e refinar métodos de produção destinados a remover seletivamente o etanol, retendo os compostos voláteis-chave que definem o perfil sensorial da bebida original.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

^bUniversidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Química (IQ/UnB), Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis.

*E-mail: labccerva@gmail.com

Palavras-chave: Cerveja não alcoólica; separação por membranas; leveduras não-*Saccharomyces*; remoção de álcool; engenharia de alimentos.

Recebido em 20 de agosto de 2025,
Aprovado em 28 de outubro de 2025,
Publicado em 03 de novembro de 2025.

Introdução

A indústria global de bebidas está em meio a uma reconfiguração impulsionada pela mudança no perfil do consumidor, que busca ativamente opções mais saudáveis e compatíveis com um estilo de vida dinâmico. Dentro desta macrotendência, o segmento de cervejas sem álcool, com teor alcoólico inferior ou igual a 0,5%, emergiu como um dos mercados de mais rápido crescimento, transcendendo sua antiga imagem de produto de nicho. O desafio intrínseco, no entanto, permanece: produzir uma bebida que replique a complexidade sensorial e a satisfação de uma cerveja tradicional na ausência de seu componente mais característico, o etanol.¹ O álcool não apenas define o efeito fisiológico, mas atua como um solvente para compostos aromáticos e contribui de maneira crucial para o corpo, a textura e a estabilidade microbiológica da bebida.²

Historicamente, os métodos para produção de cerveja sem álcool resultavam em produtos com falhas sensoriais notórias, como o indesejado "sabor de mosto" (conhecido como *worty taste*) ou um perfil aromático empobrecido.

Contudo, o avanço tecnológico das últimas décadas disponibilizou um arsenal de métodos modernos que buscam contornar esses obstáculos de forma mais eficaz. Essas abordagens podem ser amplamente categorizadas em duas frentes: as tecnologias físicas, que removem o álcool do produto final (como a destilação a vácuo e a filtração por membranas), e as abordagens biológicas, que controlam ou limitam a produção de etanol durante a fermentação (como o uso de leveduras especiais não convencionais ou a interrupção do processo em condições controladas).³

O ritmo acelerado da inovação, especialmente no desenvolvimento de novas cepas de leveduras e na otimização de tecnologias de separação, gera uma literatura científica vasta e em constante evolução. Para pesquisadores e profissionais da indústria, torna-se imperativo ter uma compreensão clara das vantagens, desvantagens e aplicabilidade de cada técnica.⁴ A Tabela 1 reúne os diversos métodos que podem ser utilizados pelos profissionais da indústria, bem como suas vantagens e desvantagens.

Tabela 1. Comparativo de técnicas. Fonte: Autoral.

Métodos	Vantagem	Desvantagem
Destilação a vácuo	Preserva compostos voláteis	Alto custo energético
Filtração por membranas	Eficiência na remoção	Possível perda de sabor
Leveduras especiais	Processo natural	Fermentação limitada
Interrupção controlada	Baixo investimento	Sabor de mosto residual

Neste contexto, o presente artigo de revisão tem como objetivo central realizar uma análise crítica e comparativa dos métodos de produção modernos para a obtenção de cervejas sem teor alcoólico. O trabalho irá avaliar as principais tecnologias físicas e biológicas sob a ótica de sua eficiência, seu impacto no perfil sensorial e aromático do produto final e sua viabilidade técnico-econômica. Ao final, busca-se oferecer um panorama atualizado que possa servir como um guia para o desenvolvimento de produtos de alta qualidade e apontar as direções futuras da pesquisa neste campo dinâmico da tecnologia cervejeira.^{3,4}

Metodologia

A produção de cerveja sem álcool de alta qualidade é um exercício de equilíbrio entre tecnologia, bioquímica e arte sensorial. Os métodos modernos podem ser divididos em duas filosofias principais: aqueles que removem o etanol após uma fermentação completa e aqueles que limitam sua formação desde o início. Esta seção analisa criticamente as principais abordagens dentro dessas categorias.

A filtração por membranas, especialmente a osmose reversa (OR), representa o estado da arte para a preservação do sabor. Neste processo, a cerveja é pressurizada contra uma membrana semipermeável que permite a passagem de moléculas pequenas como água e etanol, enquanto retém moléculas maiores responsáveis pelo aroma, cor e corpo. O permeado (água/etanol) é descartado ou tratado, e o concentrado (a "essência" da cerveja) é então rediluído com água desaerada e carbonatada.

A principal vantagem do uso de membranas, como na osmose reversa e na nanofiltração, na produção de cerveja sem álcool é a notável preservação do perfil sensorial da bebida. Isso ocorre porque o processo é realizado em baixas

temperaturas, o que evita o estresse térmico e mantém intactos os compostos aromáticos mais delicados. Além disso, a eficiência na remoção do álcool por essas tecnologias é extremamente elevada, o que contribui para a obtenção de um produto final com baixo teor alcoólico e boa qualidade sensorial.

Entretanto, essas tecnologias apresentam limitações significativas. Os custos de investimento (CAPEX) e de operação (OPEX) estão entre os mais altos quando comparados a outros métodos de desalcoolização. Esse custo elevado se deve principalmente ao alto consumo energético e à necessidade de membranas especializadas, que exigem manutenção frequente. Além disso, há o risco de incrustação (*fouling*) das membranas, o que compromete a eficiência do processo, bem como a possibilidade de perda de compostos voláteis menores, caso o sistema não seja adequadamente otimizado.

Em termos comparativos, a osmose reversa se destaca por sua maior seletividade e eficiência na separação do etanol. No entanto, a nanofiltração (NF) tem sido considerada uma alternativa promissora, ainda que menos eficaz na remoção completa do álcool. Sua principal vantagem está na capacidade de reter uma gama mais ampla de compostos de sabor de baixo peso molecular, o que pode resultar em uma cerveja sem álcool com maior complexidade sensorial e equilíbrio no perfil de sabor.

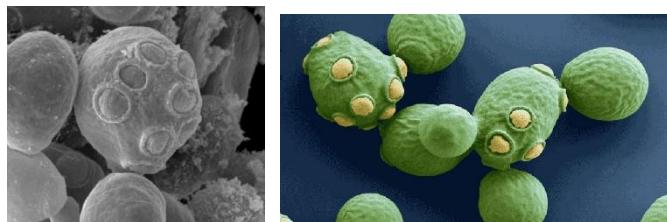
Outra abordagem relevante na produção de cerveja sem álcool é a destilação a vácuo, que se baseia no princípio de que a redução da pressão atmosférica diminui o ponto de ebulição dos líquidos. Nessa condição, o etanol, mais volátil que a água, pode ser removido a temperaturas relativamente baixas (entre 35 e 45 °C), o que ajuda a minimizar os danos térmicos que ocorreriam em uma destilação convencional à pressão atmosférica. Para mitigar a perda de compostos voláteis durante o processo, muitos sistemas incorporam uma coluna de recuperação de aromas, que permite capturar substâncias arrastadas com o vapor de etanol e reintroduzi-las na cerveja desalcoolizada.¹²

Entre as principais vantagens dessa técnica, destaca-se o custo de investimento geralmente inferior ao das tecnologias baseadas em membranas, além de sua robustez e ampla consolidação na indústria de bebidas. No entanto, mesmo sob vácuo, algum grau de estresse térmico é inevitável, podendo provocar o desenvolvimento de notas sensoriais indesejadas, como o sabor de "cozido", e a perda de compostos

aromáticos delicados, especialmente os provenientes do lúpulo. A eficiência da recuperação de aromas também é um fator crítico, cuja imperfeição pode comprometer a complexidade sensorial da cerveja final. A literatura científica apresenta opiniões divergentes quanto à eficácia da destilação a vácuo: enquanto alguns estudos a consideram uma alternativa viável e de boa qualidade, outros a classificam como inferior às técnicas de membrana, especialmente no caso de estilos mais delicados e lupulados, como as IPAs. Isso reforça que o desempenho desse método depende fortemente da otimização do equipamento e da adequação ao estilo de cerveja produzido.^{6,4}

Paralelamente aos métodos físicos de desalcoolização, há um campo em crescente inovação biotecnológica: o uso de leveduras não convencionais. Ao invés da tradicional *Saccharomyces cerevisiae*, utilizam-se cepas naturalmente incapazes de fermentar os açúcares complexos do mosto, como a maltose e a maltotriose, limitando sua atividade à glicose, frutose e outros açúcares simples. Entre os exemplos mais promissores estão *Saccharomyces ludwigii*, *Torulaspora delbrueckii* e, especialmente, *Pichia kluyveri*.⁷

Figura 01. Levedura da espécie *Saccharomyces cerevisiae* para exemplificar a morfologia desses fungos. Extraído da referência 13 e 14.



Essa estratégia apresenta como principal vantagem a eliminação da necessidade de etapas físicas de desalcoolização, reduzindo drasticamente os custos de capital (CAPEX). Além disso, algumas dessas leveduras, notadamente *P. kluyveri*, são capazes de produzir perfis sensoriais complexos, ricos em ésteres frutados, que ajudam a compensar a ausência do álcool e a conferir atratividade ao produto final.

Por outro lado, o grande desafio dessa abordagem é o sabor residual de mosto, decorrente da permanência de uma quantidade significativa de açúcares não fermentados. Isso pode resultar em uma bebida excessivamente doce, com notas de "pão cru". Ademais, a estabilidade microbiológica do produto torna-se uma preocupação, exigindo cuidados

rigorosos de pasteurização. A literatura, em geral, é consistente ao apontar que, embora promissor, o uso isolado dessas leveduras ainda não soluciona completamente o desafio sensorial da cerveja sem álcool, sendo frequentemente recomendado seu uso combinado com outras estratégias, como a inclusão de maltes especiais, para equilibrar o corpo e reduzir o dulçor residual.^{3,4}

Ao comparar diretamente os métodos, evidencia-se um claro *trade-off*. A osmose reversa se destaca pela alta fidelidade sensorial, mas impõe um custo elevado. A destilação a vácuo oferece uma solução de custo moderado, porém com riscos de dano térmico ao perfil aromático. Em contraste, as abordagens biológicas com leveduras especiais são economicamente muito atraentes e abrem portas para novos sabores, mas carregam o desafio intrínseco de evitar um perfil doce e com notas de mosto não fermentado. A escolha ideal, portanto, não é universal, dependendo diretamente do capital disponível, da escala de produção e do perfil de produto desejado.

Tabela 2. Comparativo da Destilação à Vácuo. Fonte: Autoral.

Como funciona	Vantagens	Desvantagens
Redução da pressão	Custo inferior às tecnologias de membranas	Risco de estresse térmico (sabor "cozido")
Remoção de etanol a 35°-45°	Robusteza e consolidação industrial	Perda de compostos aromáticos delicados
Sistemas com coluna de recuperação de aromas	Amplamente utilizada na indústria de bebidas	Eficácia variável dependendo do equipamento e estilo de cerveja

Resultado e discussão

A análise da literatura revela que não existe um método único e perfeito para a produção de cerveja sem álcool. A escolha representa um balanço fundamental entre a fidelidade sensorial desejada e a viabilidade técnico-econômica. Os métodos físicos, como a osmose reversa, estabelecem o gold standard em termos de qualidade e semelhança com a cerveja original, mas a um custo proibitivo para muitos produtores. Em contrapartida, os métodos biológicos, liderados pela inovação em leveduras não convencionais, democratizam o acesso à produção com baixo investimento, embora ainda enfrentem o desafio de replicar a complexidade e o equilíbrio de uma fermentação completa.⁵

Para a indústria, esta diversidade de métodos significa que a estratégia de produção pode ser alinhada ao posicionamento de mercado: grandes marcas podem investir em tecnologia de membrana para suas linhas premium, enquanto cervejarias artesanais podem explorar o potencial de leveduras especiais para criar produtos inovadores e distintos. Para a pesquisa, o foco migrou de "se é possível" para "como podemos otimizar e refinar" a experiência sensorial.

A combinação de diferentes métodos para a produção de cerveja sem álcool, conhecida como abordagem híbrida, representa uma fronteira ainda pouco explorada, mas promissora. Por exemplo, iniciar a fermentação com uma levedura não convencional, capaz de produzir ésteres agradáveis ao paladar, e posteriormente aplicar uma técnica física branda de remoção de álcool, como a nanofiltração leve, pode resultar em uma bebida que combina riqueza sensorial com baixo teor alcoólico. Essa estratégia visa unir o melhor dos dois mundos: a complexidade aromática da fermentação com a precisão das técnicas físicas.

Outro fator crítico no desenvolvimento de cervejas sem álcool é o impacto da matriz da receita. A escolha de diferentes maltes, variedades de lúpulo e adjuntos pode interagir de forma distinta com cada método de produção. Um processo que se mostra eficiente para uma Lager leve, por exemplo, pode não ser o mais adequado para uma Stout encorpada, cujos compostos sensoriais e corpo exigem uma abordagem específica para preservar suas características típicas. A compreensão dessas interações ainda está em desenvolvimento e representa um campo fértil para pesquisas futuras.

Além disso, a estabilidade sensorial ao longo da vida de prateleira da cerveja sem álcool é uma questão ainda pouco compreendida. Embora as cervejas tradicionais tenham sua evolução de sabor bem documentada, a ausência de álcool, que atua como conservante e modulador de sabor, torna a bebida mais vulnerável a mudanças indesejadas com o tempo. Isso exige cuidados adicionais tanto no processamento quanto no armazenamento, e destaca a necessidade de estudos mais aprofundados sobre *shelf life* e mecanismos de degradação sensorial em cervejas sem álcool.

O futuro da produção de cervejas sem álcool aponta para um cenário de alta precisão e personalização, impulsionado por três grandes frentes de inovação. A primeira é a engenharia de leveduras e a biologia sintética, com destaque para o uso de tecnologias como o CRISPR-Cas9, que permitem

o desenvolvimento de cepas sob medida. Essas leveduras poderão ser projetadas para produzir perfis de sabor altamente específicos, como mais notas frutadas (banana) ou menos fenólicas (cravo), sem gerar quantidades significativas de álcool.⁸

A segunda frente é o uso da inteligência artificial e da otimização de processos. Modelos baseados em aprendizado de máquina podem ser treinados com grandes volumes de dados para prever o perfil sensorial final de uma cerveja com base em centenas de variáveis de processo, como temperatura de fermentação, tipo de malte, tempo de clarificação e tipo de levedura. Isso permitirá ajustes mais rápidos e precisos nas receitas, acelerando o desenvolvimento de novos produtos.⁹

Por fim, destacam-se as tecnologias de remediação de sabor. Estão sendo desenvolvidos ingredientes e aditivos naturais, especialmente derivados do lúpulo ou de outras plantas, com o objetivo de mascarar sabores indesejados, como o residual de mosto, e de restaurar sensações perdidas com a ausência de álcool, como o "corpo" e a persistência no paladar. Esses avanços podem desempenhar um papel fundamental na aceitação comercial e sensorial das cervejas sem álcool, aproximando cada vez mais sua qualidade da experiência oferecida por suas equivalentes alcoólicas.¹⁰

A pesquisa contínua nesta área tem uma importância prática imensa. Ela não apenas habilita a criação de produtos mais saborosos e saudáveis, mas também promove a inclusão, permitindo que consumidores que não podem ou não querem ingerir álcool participem plenamente de ocasiões sociais onde a cerveja é um elemento central. Para a indústria, dominar essas tecnologias não é mais um diferencial, mas uma necessidade para competir em um mercado global cada vez mais consciente e exigente.

Conclusões

A crescente demanda por cervejas sem álcool tem impulsionado o desenvolvimento de diversas estratégias de produção, cada uma com suas particularidades e desafios. Esta revisão permitiu reunir e comparar as principais abordagens disponíveis, desde processos físicos, como a destilação a vácuo e a osmose reversa, até alternativas biológicas baseadas no uso de leveduras não convencionais. Ficou evidente que não há uma solução única e universal: cada técnica oferece vantagens específicas, mas também apresenta limitações que precisam ser consideradas de acordo com o estilo da cerveja e os objetivos sensoriais do produto final.

Ao destacar também os métodos híbridos e as novas tecnologias emergentes, como a engenharia de leveduras, a inteligência artificial e os aditivos de remediação sensorial, esta revisão contribui para uma compreensão mais ampla e atualizada do cenário técnico e científico da área. O fortalecimento desse conhecimento é essencial para que pesquisadores e profissionais da indústria possam desenvolver produtos com melhor qualidade, estabilidade e aceitação pelo consumidor. As perspectivas de inovação destacadas sinalizam que o futuro da cerveja sem álcool dependerá não apenas da redução do teor alcoólico, mas da capacidade de entregar experiências sensoriais completas, aproximando-se, cada vez mais, das cervejas tradicionais em sabor, aroma e complexidade.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Química da UnB pelo apoio às atividades de pesquisa. Este trabalho foi financiado com recursos de edital institucional.

Referências

- 1 Diário Oficial da União; Instrução Normativa Nº 65, 2019.
- 2 Vanderhaegen, B.; Neven, H.; Coghe, S.; Verstrepen, K.; Derdelinckx, G.; Verachtert, H.; The chemistry of beer aging – a critical review, *Food Chemistry*, 2006, **95**, 357–381.
- 3 Bellut, K.; Arendt, E. K.; Chance and challenge: non-Saccharomyces yeasts in non-alcoholic and low-alcohol beer brewing – a review. *Journal of the Institute of Brewing*, 2019, **125**, 429–445.
- 4 Liguori, L.; De Francesco, G.; Perretti, G.; Physical and biological methods for the production of non-alcoholic and low-alcoholic beer: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 2021, **14**, 1605–1624.
- 5 De Clippeleer, J.; De Brabanter, J.; De Rouck, G.; Towards a better understanding and managing of the flavor of alcohol-free and low-alcohol beers, *MBAA Technical Quarterly*, 2018, **55**, 101–109.
- 6 Catarino, M.; Mendes, A.; Madeira, L. M.; A review of dealcoholization of beer by membrane separation processes, *Separation and Purification Reviews*, 2009, **38**, 159–209.
- 7 Muñoz-Miranda, L. A.; Burgel, P.; Del Re, R.; Díaz-Moreno, M.; Barros-Velázquez, J.; Diéguez, A.; Levaduras no convencionales como herramientas de innovación y diferenciación en la producción de cerveza. *Revista Argentina de Microbiología*, 2021, **53**, 359–377.
- 8 Mangindaan, D.; Khoiruddin, K.; Wenten, I. G.; Beverage dealcoholization processes: past, present, and future, *Trends in Food Science & Technology*, 2018, **71**, 36–45.
- 9 Yabaci Karaoglan, S., Jung, R., Gauthier, M., Kinčl, T., & Dostálek, P. Maltose-Negative Yeast in Non-Alcoholic and Low-Alcoholic Beer Production. In *Fermentation*, MDPI, 2022, **08**.
- 10 Schreurs, M.; Piampongsant, S.; Roncoroni, M.; Cool, L.; Herrera-Malaver, B.; Vanderaa, C.; Theßeling, F. A.; Kreft, Ł.; Botzki, A.; Malcorps, P.; Daenen, L.; Wenseleers, T.; Verstrepen, K. J.; Predicting and improving complex beer flavor through machine learning, *Nature Communications*, 2024, **15**, 2368.
- 11 Adamenko, K.; Kawa-Rygielska, J.; Effect of Hop Varieties and Forms in the Hopping Process on Non-Alcoholic Beer Quality, *Molecules*, 2022, **27**, 7910.
- 12 HORÁCIO, Priscila de Souza; VEIGA, Bruno A.; LUZ, Luiz F. L.; SCHEER, Agnes de Paula. Simulation of vacuum distillation to produce alcohol-free beer. *Journal of the Institute of Brewing*, 2019, 77–82.
- 13 NASA, Leveduras da espécie *Saccharomyces cerevisiae*. [Foto]. National Aeronautics and Space Administration.
- 14 BUENO, Deyvid. Leveduras como bioestimulantes em plantas [Foto], *Agrotécnico*.

A reutilização do bagaço de malte para geração de energia

DOI: 10.5281/zenodo.17507926

Breno Rossi Celestino Machado,^a Gabriel Felizola de Soroa,^a Manoel Messias Siqueira,^a Julia Saemi F. Yasuda,^a Vitória Domenick G. R. M. Trovão,^a Mariana M. Moutinho^b e Grace F. Ghesti^{b*}

The United Nations' 2030 Agenda promotes sustainable development by integrating environmental, social, and economic aspects. In this context, biorefineries and the circular economy emerge as complementary strategies toward more sustainable production systems. Biorefineries convert biomass into energy, fuels, and high-value products, while the circular economy focuses on waste valorization and material reuse. The brewing industry, significant both economically and industrially, generates large amounts of organic waste, mainly brewer's spent grain (BSG). Although commonly used as animal feed, BSG's high organic content and lignocellulosic composition make it an excellent substrate for bioenergy production. Processes such as anaerobic digestion for biogas and alcoholic fermentation for bioethanol highlight its potential to diversify the energy matrix and reduce environmental impacts.

A Agenda 2030 da ONU promove o desenvolvimento sustentável por meio da integração das dimensões ambiental, social e econômica. Nesse contexto, as biorrefinarias e a economia circular surgem como estratégias complementares para sistemas produtivos mais sustentáveis. As biorrefinarias convertem biomassa em energia, combustíveis e produtos de alto valor agregado, enquanto a economia circular busca a valorização de resíduos e o reuso de materiais. A indústria cervejeira, de grande relevância econômica e produtiva, gera grandes volumes de resíduos orgânicos, principalmente o bagaço de malte (BSG). Embora seja tradicionalmente usado como ração animal, seu alto teor de matéria orgânica e composição lignocelulósica o tornam um substrato promissor para a produção de bioenergia. Processos como a digestão anaeróbica para biogás e a fermentação alcoólica para bioetanol reforçam seu potencial para diversificar a matriz energética e reduzir impactos ambientais.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

^bUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB). Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis.

*E-mail: labccerva@gmail.com

Palavras-chave: Bagaço de malte; Geração de energia; Biorefinaria; Economia circular; Sustentabilidade.

Recebido em 20 de agosto de 2025,
Aprovado em 28 de outubro de 2025,
Publicado em 03 de novembro de 2025.

Introdução

Um dos marcos mais significativos do século XXI foi a criação da Agenda 2030 pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015. Essa agenda representa um plano global de desenvolvimento sustentável fundamentado em 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que abrangem de forma integrada as dimensões social, econômica e ambiental.

Figura 1. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ONU).

Extraído da referência 9 e 12.



Fortemente associada ao avanço das biorrefinarias está a economia circular, um modelo que propõe substituir a lógica linear de produção, baseada na extração, transformação e descarte, por um sistema circular, fundamentado na redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais.¹³ Essa dinâmica envolve estratégias como logística reversa e simbiose industrial, contribuindo para o uso eficiente dos recursos e a redução de impactos ambientais.

Tabela 1. Comparação de abordagens. Fonte: Autoral.

Abordagem	Principais estratégias	Aplicação
Biorrefinaria	Digestão anaeróbica, fermentação alcoólica	Biogás, bioetanol, químicos de valor agregado
Economia circular	Reuso, reciclagem, valorização de resíduos	Uso de subprodutos agrícolas e industriais

Nesse cenário, os resíduos agroindustriais, frequentemente descartados de maneira inadequada, representam um desafio ambiental e social. No entanto, sua reutilização em cadeias produtivas sustentáveis para a geração de energia ou materiais de alto valor agregado mostra-se altamente atrativa para o modelo de biorrefinaria, além de contribuir de forma efetiva para o cumprimento das metas da Agenda 2030.³¹

Uma das principais indústrias globais de alimentos e bebidas é a indústria cervejeira. De acordo com dados do Sindicato Nacional da Indústria da Cerveja (SINDICERV), em 2023 foram produzidos mais de 15 bilhões de litros de cerveja no Brasil.⁵ Essa produção expressiva destaca a importância econômica do setor tanto no cenário nacional quanto internacional. No entanto, a atividade gera uma quantidade igualmente expressiva de resíduos, com destaque para o bagaço de malte. O bagaço de malte configura-se como um dos principais resíduos agroindustriais do mundo, em razão do grande volume gerado. Estima-se que, para cada 1.000 litros de cerveja produzidos, são gerados cerca de 250 kg de bagaço úmido, o que representa aproximadamente 3,75 milhões de toneladas por ano apenas no Brasil.¹⁹

Diante desses números expressivos, torna-se urgente a busca por alternativas de reaproveitamento desse resíduo. Embora seu uso mais comum seja na ração animal, devido ao seu alto teor de proteínas e fibras, o bagaço de malte também vem sendo empregado na produção de embalagens biodegradáveis, compostagem, substrato agrícola e até na alimentação humana, em produtos como pães, biscoitos e barras energéticas.²⁶ Contudo, um dos usos mais promissores e estratégicos do bagaço de malte está na geração de energia, atendendo à crescente demanda energética global. Através de processos biotecnológicos, é possível convertê-lo em biocombustíveis, como bioetanol e biogás, que podem ser utilizados para suprir o consumo energético tanto das próprias fábricas quanto de outros setores.

Este trabalho abordará as principais pesquisas desenvolvidas na área de produção de energia a partir do bagaço de malte, destacando os avanços científicos, as tecnologias aplicadas e as perspectivas para a valorização deste resíduo dentro do paradigma da economia circular e da sustentabilidade.

Metodologia

Os objetivos deste trabalho consistem em realizar uma análise detalhada do principal resíduo gerado durante o

processo de produção de cerveja, o bagaço de malte, abordando não apenas sua composição físico-química, mas também suas características estruturais, potencial de aproveitamento e as estimativas de produção em nível nacional e industrial. Busca-se compreender a relevância desse subproduto dentro da cadeia produtiva cervejeira e sua representatividade em termos de volume e impacto ambiental. Além disso, o trabalho tem como propósito examinar estudos e pesquisas que exploram diferentes formas de reaproveitamento do bagaço de malte voltadas à geração de energia renovável, destacando rotas tecnológicas como a produção de biogás por digestão anaeróbia, bio-óleo por pirólise, etanol de segunda geração por fermentação e carvão vegetal por processos termoquímicos.

Dessa forma, pretende-se contribuir para a discussão sobre alternativas sustentáveis de valorização de resíduos agroindustriais e diversificação da matriz energética.

Resultados e discussão

A história da produção de cerveja é fascinante e remonta a tempos antigos, com indícios que sugerem sua origem por volta de 7.000 a.C. na Mesopotâmia. No Antigo Egito, a cerveja desempenhava um papel importante na vida cotidiana, sendo consumida em grandes quantidades e associada a rituais religiosos, além de servir como forma de pagamento para trabalhadores nas construções. Por volta de 1770 a.C. foi instituída a primeira lei relacionada à produção e comercialização de cerveja, o Código de Hamurabi. Essa legislação regulamentou tanto a qualidade da bebida produzida quanto a quantidade que cada indivíduo poderia adquirir diariamente, podendo ser aplicada a pena de morte para quem fraudasse a cerveja.

Durante a Idade Média, a produção de cerveja se expandiu pela Europa, especialmente sob a influência dos monges, que aperfeiçoaram as técnicas de fermentação e se tornaram os primeiros pesquisadores da bebida. Foi nesse período que o lúpulo foi introduzido, não apenas como conservante, mas também para conferir um amargor característico à cerveja. Avanços significativos ocorreram com a Revolução Industrial, incluindo a adoção de técnicas de refrigeração e pasteurização. Além disso, nesse contexto, as mulheres assumiram a responsabilidade pela produção caseira de cerveja.

No Brasil, a cerveja chegou junto com as colônias europeias. Inicialmente, as cervejas comercializadas eram importadas da Europa, mas, com o tempo, surgiu a necessidade de produção local. No entanto, a dificuldade de encontrar

malte, um dos principais ingredientes da cerveja, levou ao uso de outros grãos como alternativas, como milho, trigo e arroz. Essa substituição impactou a qualidade da bebida. As primeiras produções industriais no Brasil surgiram entre 1870 e 1880, no estado do Rio Grande do Sul.

Recentemente, a produção de cerveja artesanal tem ganhado destaque, proporcionando aos entusiastas uma ampla variedade de sabores e estilos. A cultura da cerveja artesanal se consolidou nas últimas décadas, com muitos produtores independentes inovando em receitas e técnicas. Esse crescimento é atribuído à acessibilidade do processo, que, apesar de não ser excessivamente complicado, demanda um conhecimento aprofundado e atenção meticolosa aos detalhes.

Cerveja

O Decreto nº 9902 de 2019 (de 8 de julho de 2019) define que cerveja é uma bebida alcoólica obtida pela fermentação do mosto de cevada por uma levedura cervejeira.¹⁷ A sua produção é a partir de quatro ingredientes principais: água, malte, lúpulo e levedura.

A água constitui entre 90% e 95% da composição da cerveja, sendo essencial que seja de alta qualidade, livre de cloro e contaminantes. Portanto, é fundamental garantir que a água utilizada seja tratada e monitorada quanto à sua pureza (SILVA, 2024). Geralmente, são realizadas análises para verificar se a água está livre de turbidez, que está relacionada à quantidade de partículas em suspensão. Além disso, o controle do pH é crucial, com uma faixa ideal entre 5 e 9,5. Também é importante realizar o controle microbiológico para assegurar que a água esteja livre de contaminações.¹⁵

O malte é a base da cerveja, pois serve como fonte de enzimas e fornece os açúcares fermentáveis, além de contribuir para o sabor e a cor característicos da bebida. Ele é obtido através do processo de malteação de grãos de cereais, como cevada, trigo, centeio ou aveia. Nesse processo, ocorre a germinação controlada do grão, seguida de sua secagem, que converte o amido em açúcares fermentáveis.⁷

O lúpulo desempenha um papel fundamental ao conferir amargor e aroma à cerveja, além de proporcionar estabilidade no sabor e retenção da espuma. Também oferece proteção antimicrobiana e antioxidante. O lúpulo é classificado em dois tipos: aromático e de amargor. O lúpulo aromático é geralmente adicionado no final do processo de fervura, trazendo fragrância à cerveja, enquanto o lúpulo de amargor é adicionado no início, intensificando o amargor da bebida.²⁰

A levedura é essencial no processo de fermentação, pois são microorganismos responsáveis por converter os açúcares disponíveis em álcool e gás carbônico. As leveduras são divididas em dois grupos: as de baixa fermentação, que produzem cervejas mais leves e com menor teor alcoólico, e as de alta fermentação, que resultam em cervejas mais encorpadas e com maior teor alcoólico.²⁴

Produção de Cerveja

A produção de cerveja envolve diversas etapas, que incluem moagem, mosturação, filtração, fervura, resfriamento, fermentação, maturação, pasteurização e envase.¹⁹

Inicialmente, realiza-se a moagem do malte, com o objetivo de obter partículas menores e mais homogêneas, o que facilita a extração dos açúcares fermentáveis durante a mosturação. Grãos uniformes aumentam a eficiência desse processo, mas uma moagem excessiva pode liberar compostos indesejados, como taninos e fenóis. Em seguida, o malte moído é misturado com água quente, formando o mosto. Esse processo, conhecido como mosturação, é responsável pela hidrólise dos açúcares fermentáveis presentes no malte. Durante essa etapa, enzimas convertem o amido em açúcares fermentáveis, influenciando diretamente o teor alcoólico, a cor e a estabilidade da cerveja. A filtração ocorre após a mosturação, separando o mosto do bagaço de malte, esse processo melhora a cor da cerveja, remove impurezas e sabores indesejados, além de eliminar a turbidez. Na etapa seguinte, o mosto é fervido com a adição de lúpulo, que contribui para o sabor, amargor e aroma da cerveja, o tempo e a temperatura de fervura podem influenciar o resultado final.

O lúpulo pode ser adicionado em diferentes momentos: no início para o amargor e no final para o aroma. Após a fervura, o mosto é resfriado para temperaturas entre 10 e 15 °C e levado para a fermentação. Durante a fermentação, os açúcares fermentáveis são consumidos pelas leveduras, transformando-se em álcool e dióxido de carbono, nessa etapa que define tanto o teor alcoólico quanto a textura da cerveja. O tipo de levedura utilizada, assim como a temperatura e o tempo de fermentação, impactam diretamente o produto final.

Após a fermentação, a bebida é deixada para descansar a temperaturas mais baixas por um período variável, dependendo do tipo de cerveja desejada. Essa fase de maturação aprimora o sabor, aroma e textura da bebida. Após a maturação, a mistura é filtrada para remover resíduos indesejáveis, leveduras e partículas em suspensão. Por fim, a

cerveja passa por pasteurização, eliminando microorganismos, antes de ser envasada em garrafas, latas ou barris.

Resíduos da indústria cervejeira

De acordo com dados do SINDICERV de 2023, o Brasil é o terceiro maior produtor de cerveja do mundo, com uma produção estimada em cerca de 15,3 bilhões de litros neste ano. No entanto, a expressiva produção deste setor industrial enfrenta desafios relacionados à gestão dos resíduos gerados. Os principais subprodutos da fabricação de cerveja incluem bagaço de malte, trub e levedura.

O bagaço de malte é o subproduto mais abundante na produção de cerveja, composto basicamente por cascas de grãos de cereais, predominantemente cevada.³ Ele é extraído durante a filtração após o processo de mosturação, sendo estimado que cerca de 250 kg de bagaço são gerados para cada 1.000 litros de cerveja produzidos. Dessa forma, a quantidade anual de bagaço de malte gerada no Brasil chega a aproximadamente 3,75 milhões de toneladas. Segundo Massardi *et al.*, esse subproduto contém cerca de 16% de celulose, 30% de hemicelulose, 20% de lignina, 21% de proteínas e outros componentes, o que permite seu reaproveitamento em diversas aplicações, como nutrição humana e animal, geração de energia por queima direta ou produção de combustíveis, confecção de materiais adsorventes para limpeza de efluentes, e extração de substâncias para bioproductos.^{27,28}

O trub é gerado durante a coagulação de proteínas durante a cocção do mosto. Estima-se que a cada 1.000 litros de cerveja produzidos, cerca de 3 kg de trub são gerados, resultando em aproximadamente 46 mil toneladas de trub produzidas anualmente no Brasil. No entanto, há poucos estudos que investiguem o reaproveitamento desse subproduto, que, em sua maioria, é destinado à nutrição animal.²⁸

A levedura residual, responsável pela conversão de açúcares em álcool e gás carbônico durante a fermentação, pode multiplicar-se de 3 a 5 vezes. Esse subproduto é retirado durante a etapa de maturação, quando as leveduras ficam suspensas na solução. Na indústria, as leveduras são frequentemente reutilizadas para inoculação de novos tanques, embora tenham um número limitado de ciclos de reutilização. Pesquisas estão sendo realizadas para explorar o aproveitamento da levedura residual após o esgotamento de seu uso na produção de cerveja, com possíveis aplicações na nutrição animal e na área farmacêutica.²⁸

Tecnologias Atuais

Diante de dados significativos, a busca por alternativas para o reaproveitamento desse resíduo torna-se imprescindível. O gerenciamento de resíduos é crucial não apenas para a proteção do meio ambiente, mas também para a saúde pública e a sustentabilidade econômica. Isso envolve a implementação de estratégias que promovem a redução, reutilização e reciclagem, minimizando a quantidade de resíduos sem destinação adequada.

Aregar valor aos resíduos industriais representa um novo desafio. Nesse contexto, o reaproveitamento do bagaço de malte se destaca, pois é o maior resíduo gerado na produção de cerveja, um segmento que tem crescido nos últimos anos. Uma das abordagens estudadas é o uso do bagaço de malte para a geração de energia, atendendo à crescente demanda energética global. Por meio de processos biotecnológicos, é possível convertê-lo em biocombustíveis, como bioetanol e biogás, que podem ser utilizados para suprir o consumo energético tanto das próprias fábricas quanto de outros setores.

Tabela 2. Estratégias de gerenciamento de resíduos. Fonte: Autoral.

Estratégia	Objetivos	Benefícios
Redução	Diminuir a geração de resíduos	Menos impacto ambiental
Reutilização	Aproveitar resíduos em novos usos	Economia de recursos
Reciclagem	Transformar resíduos em novos produtos	Geração de valor

Biogás

A tecnologia de digestão anaeróbica, ou metanização, tem se mostrado eficaz no tratamento de resíduos agroindustriais e efluentes com composição orgânica. Esse processo contribui significativamente para a redução do volume de resíduos destinados a aterros sanitários e para a produção de energia renovável. A digestão anaeróbica é um processo biológico em que microrganismos decompõem a matéria orgânica na ausência de oxigênio, resultando na formação de biogás, composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂).¹⁶

O processo de digestão anaeróbica é dividido em quatro etapas principais:⁶

- Hidrólise: Os biopolímeros, como proteínas, lipídios e carboidratos, são quebrados em compostos mais simples, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos.
- Acidogênese: As substâncias resultantes da hidrólise são convertidas em ácidos voláteis, gás hidrogênio e dióxido de carbono pela ação de microrganismos acidogênicos. A quantidade de hidrogênio nesta fase é crucial, pois altas concentrações podem inibir a eficiência do processo.
- Acetogênese: Os produtos da acidogênese são transformados em ácidos acéticos, além de mais gás hidrogênio e dióxido de carbono, por microrganismos acetogênicos.
- Metanogênese: Na etapa final, os ácidos acéticos e o hidrogênio são convertidos em metano e dióxido de carbono por microrganismos metanogênicos. O metano gerado é o principal produto da digestão anaeróbica e pode ser utilizado como biocombustível.

Esse processo ocorre em reatores ou biodigestores sob condições controladas, e a escolha do tipo de biodigestor depende do sistema de alimentação, temperatura de operação e método de agitação. Durante a digestão anaeróbica, é essencial considerar diversas condições:¹⁴

- Nutrientes: Os microrganismos requerem nutrientes específicos para seu crescimento e atividade. Os nutrientes mais encontrados nos substratos são Nitrogênio, Fósforo, Enxofre, Ferro, Níquel, Cobalto e Molibdênio.
- pH: Os microrganismos metanogênicos são sensíveis a variações de pH, funcionando melhor entre 6 e 8.
- Temperatura: A temperatura afeta diretamente a atividade microbiana. Os microrganismos são classificados como psicrófilos (4 a 15 °C), mesófilos (20 a 40 °C) e termófilos (45 a 75 °C).

Mazur et al. (2023) analisaram o potencial de produção de biogás utilizando bagaço de malte em dois tratamentos: um com proporção de 1:1 em relação ao inóculo de resíduos domésticos e outro com proporção de 2:1, mantendo os processos a 33 °C.²⁹ O tratamento 1:1 apresentou a maior porcentagem de metano, atingindo 43%, enquanto o bagaço puro gerou um maior volume de metano, com 23,7%.

Polastri et al. (2023) também estudaram a produção de biogás com a mistura de inóculo e bagaço de malte, utilizando lodo anaeróbio como inóculo. Eles encontraram

rendimentos acima de 50% de metano, com temperatura controlada a 37 °C.

Cani e colaboradores investigaram o tratamento anaeróbio de bagaço de malte com dejetos bovinos e suínos, com reações realizadas na proporção de 1:1 em temperaturas variando de 35 a 55 °C.¹⁰ O melhor resultado foi obtido na digestão de bagaço com dejetos suínos a 55 °C, gerando 1012 mL de biogás para 50 g de cada substrato e 300 g de água, embora a proporção de metano não tenha sido especificada.

Endler (2021) comparou a produção de biogás a partir de celulose microcristalina e bagaço de malte, observando que o bagaço de malte apresentou uma porcentagem de metano de cerca de 45%, enquanto a celulose microcristalina alcançou aproximadamente 42%.²¹

Além da produção de biogás, a digestão anaeróbica gera um resíduo rico em nutrientes que pode ser utilizado como biofertilizante na agricultura, contribuindo para o fechamento do ciclo de nutrientes.

Bióleo e Biochar

O bagaço de malte, resíduo gerado na produção de cerveja, tem se mostrado um material promissor para a pirólise, um processo que consiste na conversão de biomassa em produtos de maior valor agregado.²²

A pirólise é um processo termoquímico que envolve o aquecimento do bagaço de malte a altas temperaturas, geralmente entre 300 °C e 700 °C, em um ambiente com ausência total ou parcial de oxigênio. Durante esse processo, a biomassa é decomposta, resultando em três principais frações:²³

- Líquida - Bio-óleo: Um líquido complexo que pode ser utilizado como combustível ou como matéria-prima para a produção de produtos químicos. O bio-óleo contém uma variedade de compostos orgânicos, incluindo fenóis, álcoois e ácidos, que podem ser refinados para aplicações industriais. Estudos mostram que pode ser tratado com hidrogênio para produção de diesel verde e gasolina verde.
- Gasosa - Gás de pirólise: Composto principalmente por gases combustíveis como metano (CH₄), hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO). Este gás pode ser utilizado para gerar energia elétrica ou térmica, sendo uma fonte potencial de energia renovável.
- Sólido - Carvão vegetal ou biochar: Um resíduo rico em carbono que possui alta capacidade de adsorção e pode ser

utilizado para melhorar a qualidade do solo ou como combustível.

A formação predominante dos produtos na pirólise é determinada pelas condições do processo. Em geral, processos realizados a temperaturas mais baixas e com longos tempos de residência, conhecidos como pirólises lentas, resultam em uma maior produção de produtos gasosos. Por outro lado, processos que ocorrem a temperaturas elevadas e com tempos de residência prolongados, denominado pirólise rápida, favorecem a formação de frações sólidas. Caso o objetivo seja maximizar a produção de bio-óleo, a pirólise intermediária é a mais indicada, onde tanto a temperatura quanto o tempo são mantidos em faixas moderadas.

BOREL et al. (2018) investigaram a pirólise rápida do bagaço de malte em um reator de leito de jorro. Os resultados foram promissores, com a formação de 56,5% de gás, 42,4% de bio-óleo e 1,1% de carvão. O bio-óleo produzido apresentou em sua composição hidrocarbonetos aromáticos, compostos fenólicos e nitrogenados, enquanto o carvão exibiu uma estrutura porosa.

Gonçalves et al. (2014) focaram na maximização da produção de bio-óleo e carvão, realizando reações a temperaturas variando entre 300 °C e 650 °C, sendo 500 °C a temperatura ótima. Nesse processo, foram obtidos 42% de bio-óleo, 30,7% de carvão e 27,8% de gás. O bio-óleo gerado apresentou duas fases, uma aquosa e outra orgânica, com predominância da fase aquosa. O carvão, por sua vez, mostrou uma estrutura porosa reduzida.

Zabaleta et al. (2024) avaliaram o uso do bagaço de malte na produção de biochar, analisando as variações de temperatura durante o processo de pirólise. Os carvões vegetais produzidos apresentaram um teor de carbono superior a 62% e um teor de níquel inferior a 11%, além de um pH em torno de 7, o que os torna adequados para aplicação em solos neutros e levemente alcalinos, ajudando a tamponar o pH. O carvão mais estável foi obtido a uma temperatura de 600 °C, sendo apropriado para melhorar a qualidade da água no cultivo do solo. Por outro lado, o carvão com maior retenção de carbono foi produzido a 400 °C, o que o torna adequado para aplicações de captura de carbono. n

Bioetanol

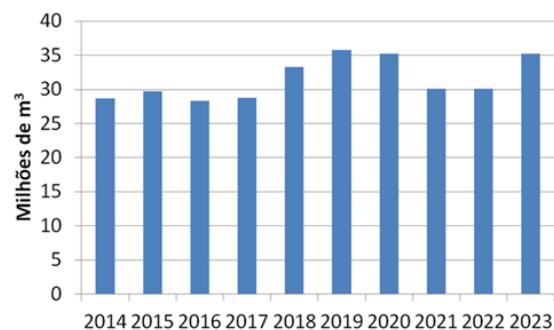
Um dos grandes marcos do século XX foi a crise do petróleo em 1973. Tal acontecimento foi o pontapé inicial para que diversos governos mundiais repensassem suas políticas

energéticas visando diminuir a dependência do petróleo e diversificar suas matrizes energéticas. No caso brasileiro, o governo federal criou o Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL) em 1975 que tem por objetivo regular e implementar o uso de etanol anidro em mistura com a gasolina, inicialmente com 5% de álcool.²⁵

Ao longo dos anos a produção de etanol teve uma grande evolução conforme mostra a Figura 2. Isso se deve ao aumento dos limites mínimos e máximos de etanol na gasolina estabelecidos pelo Conselho Nacional de Políticas Energéticas (CNPE), o qual estabelece atualmente 18 e 27,5% como os limites inferiores e superiores respectivamente.³⁰

Grande parte da produção de etanol é decorrente do processamento do bagaço de cana de açúcar, usualmente denominado de etanol de segunda geração ou etanol celulósico, o que contribui para aumentar a sustentabilidade do processo de forma a alcançar a demanda nacional.

Figura 2. Evolução da produção de etanol. Extraído da referência 2.



Esse processo se dá através da conversão da celulose presente no bagaço para glicose por meio de uma hidrólise enzimática. Posteriormente, a glicose é convertida em etanol pela ação de microrganismos como a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, a qual é amplamente usada na indústria cervejeira.¹⁸

A viabilidade econômica das biorrefinarias baseadas no bagaço de malte depende da sua composição química, baixo custo e ampla disponibilidade. Cerca de 50% do seu peso seco é composto por carboidratos, seguidos de proteínas e lipídios. Como subproduto barato e gerado em grande escala por poucas cervejarias de grande porte, o bagaço apresenta vantagens logísticas em relação à biomassa agrícola, cuja composição é mais variável e coleta mais complexa.

No entanto, a aplicação em escala industrial apresenta entraves. Primeiramente, o alto teor de umidade do bagaço dificulta seu armazenamento e transporte, sendo necessário um pré-tratamento rápido para que a matéria orgânica não seja biologicamente contaminada. Ademais, a recalcitrância da lignina é um empecilho pois dificulta o acesso dos microrganismos e reagentes químicos à celulose, limitando a sua conversão em glicose e consequentemente o rendimento do processo. Outro problema é que a biomassa é pouco padronizada para as cervejarias, o que eleva os já elevados custos de pré-tratamento, que são o principal problema para a viabilidade econômica do processo. Por fim, a tecnologia necessita de melhorias, principalmente para se obter organismos mais eficientes e que sejam capazes de fermentar açúcares não convencionais.⁴

Conclusão

O bagaço de malte é o subproduto mais gerado durante o processo de fabricação da cerveja. Rico em fibras, proteínas e compostos fenólicos, ele se destaca como um material valioso, embora sua composição varia conforme o tipo de cerveja e a cevada utilizada. Este resíduo, frequentemente negligenciado, possui um grande potencial para diversas aplicações, especialmente na geração de energia renovável, contribuindo para a sustentabilidade e a economia circular.

O uso desse material ajuda a reduzir a produção de resíduos na indústria cervejeira, promovendo uma produção com menores impactos ambientais. Além disso, serve para a geração de biocombustíveis, atendendo à crescente demanda energética dos últimos anos e valorizando um recurso pouco explorado. Entretanto, alguns fatores podem dificultar seu uso, como a variabilidade da matéria-prima, que depende do tipo de cerveja produzida, os custos de processamento, que exigem a implementação de novas tecnologias, e a concorrência com outras destinações, como a nutrição animal e humana.

Estudos recentes têm investigado a utilização do bagaço de malte como uma fonte de geração de energia. No entanto, a continuidade da pesquisa e do desenvolvimento é essencial para otimizar esses processos. A pirólise do bagaço de malte apresenta um potencial significativo para a produção de bio-óleo. Este bio-óleo pode ser reaproveitado na própria indústria cervejeira, aumentando a eficiência energética. Além disso, o processo de pirólise também gera carvão vegetal, que agrupa valor ao resíduo. A pirólise é uma tecnologia térmica já estabelecida e amplamente utilizada em outros resíduos industriais, como pneus inservíveis. Sua aplicação ao bagaço de malte pode oferecer soluções sustentáveis para a gestão de

resíduos na indústria cervejeira. A produção de biogás a partir do bagaço de malte é um segmento promissor. Estudos indicam que o biogás gerado possui características favoráveis, podendo ser utilizado como fonte de energia renovável. A técnica de produção de biogás por decomposição é aplicada em diversos substratos da agroindústria, embora tenha maior foco em produções localizadas em zonas rurais.

A utilização do bagaço de malte para geração de energia, por meio da pirólise, da fermentação e decomposição, oferece oportunidades significativas para aumentar a sustentabilidade na indústria cervejeira. O avanço nas pesquisas nessa área é crucial para maximizar o aproveitamento desse recurso.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis (LMCERVA) da Universidade de Brasília pelo suporte técnico e infraestrutura. Agradecem também às agências de fomento pelo apoio financeiro.

Referências

- 1 AGUARONE, E. et al. Biotecnologia industrial: biotecnologia na produção de alimentos. *São Paulo: Blucher*, 2001. 523.
- 2 Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-brasileiro-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-2024#Secao4>>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- 3 ALIYU, S.; BALA, M. Brewer's spent grain: A review of its potentials and applications. *African Journal of Biotechnology*, 2011, **10**.
- 4 Alonso-Riaño, P.; Amândio, M. S. T.; Xavier, A. M. R. B.; Beltrán, S.; Sanz, M. T. Subcritical Water as Pretreatment Technique for Bioethanol Production

- from Brewer's Spent Grain within a Biorefinery Concept. *Polymers*, 2022, **14**.
- 5 Anuário da Cerveja 2024. Disponível em: <<https://sindicerv.com.br/2025/wp-content/uploads/2024/05/Anuario-da-cerveja-2024-referencia-2023-MAPA-versao-web.pdf>>. Acesso em: 02 jul. 2025.
- 6 ARAÚJO, A. P. C. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- 7 Barros, C. R.; Ghesti, G. F. *Malte: essência da cerveja*. Ebook - Universidade de Brasília, 2016.
- 8 BJCP. *BJCP Style Guidelines for Beer, Mead, e Cider*. 2015.
- 9 Caldeira-Pires, A.; da Luz, S.; Palma-Rojas, S.; Rodrigues, T.; Silverio, V.; Vilela, F.; Barbosa, P.; Alves, A. Sustainability of the Biorefinery Industry for Fuel Production. *Energy*, 2013, **06**.
- 10 CANI, A.; TRIPOLI, K. D.; SOARES, C. S. G. G.; ROSÁRIO, J. A.; SOARES, J. F. Produção de Biogás a Partir da Co-Digestão Anaeróbia de Dejetos Bovinos e Suínos com Bagaço de Malte. 6º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, Foz do Iguaçu, 2023.
- 11 CAVALEIRO, A. J. V.; ALVES, M. M. Digestão anaeróbia. *Revista de Ciência Elementar*, 2020, **08**.
- 12 Chaturvedi, T.; Torres, A.; Stephanopoulos, G.; Thomsen, M.; Schmidt, J. Developing Process Designs for Biorefineries—Definitions, Categories, and Unit Operations. *Energy*, 2020, **13**.
- 13 Corona, B.; Shen, L.; Reike, D.; Carreón, J.; Worrell, E. Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics. *Resour. Conserv. Recycl*, 2019, **151**.
- 14 COSTA, E. S.; BARBOSA FILHO, O.; GIORDANO, G. Reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB): uma abordagem concisa. Coletânea em Saneamento Ambiental – Série Tecnológica: Tecnologias Ambientais*, 2014, **05**.
- 15 COSTA, L. R. N. da. Avaliação do gerenciamento dos resíduos em uma cervejaria. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.
- 16 COSTA, S. A. da; EVARISTO, R. B. W.; SILVA, M. L. da; BRAGA, P. R. S.; GHESTI, G. F. Prospecção Tecnológica e Científica de Bioprocessos de Conversão do Bagaço de Malte com Ênfase em Compostagem e Biodigestão. *Revista Virtual de Química*, 2024, **16**.
- 17 DECRETO nº 9.902, de 8 de julho de 2019.
- 18 Agrawal, D.; Gopaliya, D.; Willoughby, N.; Khare, S. K.; Kumar, V. Recycling potential of brewer's spent grains for circular biorefineries. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2023, **40**.
- 19 DRAGONE, G.; MUSSATTO, S. I.; NOGUEIRA, A. D.; SILVA, J. B. de A. e. Revisão: Produção de Cerveja: Microrganismos Deteriorantes e Métodos de Detecção. *Brazilian Journal of Food Technology*, 2007, **10**.
- 20 DURELLO, R. S.; SILVA, L. M.; JR, S. B. Química do Lúpulo. *Química Nova*, 2019, **48**.
- 21 ENDLER, I. A. Avaliação da Produção de Biogás a Partir de Resíduos Sólidos Orgânicos da Indústria Cervejeira. Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2021.
- 22 EVARISTO, R. B. W.; COSTA, A. A.; DANTAS, P. G. B.; GHESTI, G. F. Biorefinery development based on brewers' spent grain (BSG) conversion: A forecasting technology study in the Brazilian scenario. Preprint.org, 2023.
- 23 EVARISTO, R. B. W.; FERREIRA, R.; RODRIGUES, J. P.; RODRIGUES, J. S.; GHESTI, G. F.; SILVEIRA, E. A.; COSTA, M. Multiparameter-analysis of CO₂/Steam-enhanced gasification and pyrolysis for syngas biochar production from low-cost feedstock. *Energy Conversion and Management: X*. 2021, **12**.
- 24 FIGUEIREDO, G. S. Análise de impactos ambientais ocasionados por resíduos de malte oriundos de uma cervejaria: um estudo de campo em uma empresa localizada no Norte do Brasil. Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

- 25 Goldemberg, J.; Coelho, S. T.; Nastari, P. M.; Lucon, O. Ethanol learning curve – the Brazilian experience. *Biomass Bioenergy*, 2004, **26**.
- 26 Jovine, K. E.; Philimon, D. N.; Godlisten, N. S. Evaluating the potential applications of brewers' spent grain in biogas generation, food and biotechnology industry: A review. *Helixon*, 2022, **08**.
- 27 MASSARDI, M. M.; MASSINI, R. M. M.; SILVA, D. J. Caracterização Química do Bagaço de Malte e Avaliação do seu Potencial para Obtenção de Produtos de Valor Agregado. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 2020, **06**.
- 28 MATHIAS, T. R. S.; MELLO, P. P. M. de; SERVULO, E. F. C. Caracterização de Resíduos Cervejeiros. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, 2014.
- 29 MAZUR, D. L.; GUERI, M. V. D.; FURTADO, A. C.; SCHIRMER, W. N. Análise do Potencial de Geração de Biogás a Partir de Bagaço de Malte. 7º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, Bento Gonçalves, 2023.
- 30 Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-passa-a-ter-competencia-para-fixar-teor-de-etanol-anidro-na-gasolina>>. Acesso em: 3 jul. 2025.
- 31 Moyer, J. D.; Hedden, S. Are we on the right path to achieve the sustainable development goals?, *World Dev.*, 2020, **167**.
- 32 Ninian Prem Prashanth, P.; Aditya, V.; Soni, P.; Pradeep Kumar, G.; Rama Raju, B.; Minaxi, S.; Ranjna, S.; Vijay Kumar, T.; Vijai Kumar, G. Brewer's spent grains-based biorefineries: A critical review. *Fuel*, 2022, **317**.
- 33 Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 03 jul. 2025.

Cerveja sem glúten: métodos de produção

DOI: 10.5281/zenodo.17507077

Guilherme Santana Mendes,^a Bruno,^a Sérgio Rodrigues dos Reis Júnior,^a Julia Saemi F. Yasuda,^a Mariana M. Moutinho^b e Grace F. Ghesti^{b*}

Gluten-free beers are a challenge both from technical and commercial perspectives, given that the ingredients traditionally used in their production process have a high gluten content. Gluten is a group of proteins found in cereals such as barley, one of the main raw materials in beer brewing. Thus, developing gluten-free recipes becomes a challenge, often requiring the use of alternative raw materials such as sorghum, rice, corn, or buckwheat, which contain lower levels of this compound. Another strategy adopted by manufacturers is to brew beer with barley or wheat and then treat it with enzymes that degrade gluten, which, however, increases the beverage's cost. Therefore, research in this field is of great importance for individuals who enjoy beer but suffer from celiac disease, which prevents them from consuming this drink.

Cervejas sem glúten são um desafio tanto nos aspectos técnicos como comerciais, haja vista que, tradicionalmente, os ingredientes utilizados em seu processo de fabricação possuem um elevado teor de glúten, um grupo de proteínas encontrado em cereais como a cevada, um dos principais ingredientes usados na produção de cerveja. Desse modo, a formulação de receitas sem glúten se torna um problema, levando a utilização de insumos alternativos como sorgo, arroz, milho ou trigo sarraceno, que possuem um teor menor desse composto. Outra estratégia adotada pelos fabricantes é a produção de cerveja com cevada ou trigo e, posteriormente, a realização de um tratamento com enzimas que degradem o glúten, contudo, esse processo eleva o preço da bebida. Portanto, pesquisas nessa área são de suma importância para aqueles indivíduos que apreciam cerveja e que são portadores da doença celíaca.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

^bUniversidade de Brasília (UnB), Instituto de Química, Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis, Brasília, DF, Brasil

*E-mail: labccerva@gmail.com

Palavras-chave: Glúten; produção de cerveja; doença celíaca; sem glúten; cevada.

Recebido em 20 de agosto de 2025,
Aprovado em 28 de outubro de 2025,
Publicado em 03 de novembro de 2025.

Introdução

A cerveja é uma das bebidas alcoólicas mais consumidas ao redor do mundo. Porém, a cerveja convencional não é segura para pacientes celíacos, uma vez que a ingestão de proteínas contidas em grãos como cevada, aveia, centeio e trigo, causa diversos efeitos adversos, trazendo danos ao intestino delgado e prejudicando a absorção de nutrientes. Em geral, uma solução efetiva para o problema é evitar o consumo dos alimentos que contêm glúten. Entretanto, visando o bem estar e liberdade dos portadores dessa condição, foram desenvolvidas as cervejas sem glúten. Nesse artigo pretendemos revisar e explicar os diferentes métodos de produção dessa bebida.

Metodologia

Esta revisão foi conduzida com base na literatura científica disponível em bases de dados como *Scopus*, *Web of Science*, *PubMed* e *Google Scholar*. Foram utilizados descritores como “gluten-free beer”, “gluten quantification”,

“analytical methods”, “gluten detection” e “beer production”, combinados com operadores booleanos (AND/OR).

Foram incluídos artigos originais e de revisão publicados entre 1980 e 2025 em inglês, português e espanhol, relacionados à produção de cervejas sem glúten, métodos analíticos de detecção de glúten e evolução histórica da pesquisa. Documentos sem revisão por pares ou sem acesso ao texto completo foram excluídos. Os artigos foram selecionados, sendo categorizados em três eixos temáticos: (1) processo de produção de cervejas sem glúten; (2) cronologia e evolução das pesquisas; (3) métodos analíticos para detecção de glúten.

Resultados e discussão

Processo de produção de cerveja sem glúten

A produção cervejeira baseia-se essencialmente em quatro ingredientes: água, lúpulo, levedura e malte. Este último, derivado principalmente da cevada, é a principal fonte de glúten da cerveja. O glúten corresponde a um conjunto de

proteínas presentes no endosperma amiláceo do grão, representando cerca de 75% do total proteico, sendo aproximadamente 50% formado por prolaminas e 25% por gluteninas.¹ Ademais, a produção de cervejas sem glúten apresenta diferenças significativas em relação ao método tradicional, que utiliza predominantemente malte de cevada ou trigo, que são grãos naturalmente ricos em glúten. Essas diferenças afetam todas as etapas do processo produtivo, desde a escolha das matérias-primas até a fermentação, maturação e envase.

Na fase de brassagem, nota-se que os grãos alternativos utilizados para fabricar cervejas sem glúten, como sorgo, arroz, milho ou trigo sarraceno, contém uma quantidade reduzida de enzimas amilolíticas naturais se comparados ao malte de cevada.² Portanto, faz-se necessário incorporar enzimas exógenas, como a amiloglucosidase, para assegurar que a conversão dos amidos em açúcares fermentáveis ocorra de forma eficaz.³ Ademais, é fundamental ajustar os níveis de temperatura e pH durante a brassagem, dado que esses grãos apresentam composições físico-químicas distintas das da cevada.⁴

Durante a fase de fervura, apesar de a isomerização dos alfa-ácidos do lúpulo e a esterilização do mosto acontecerem de maneira similar em ambos os métodos, a redução na quantidade de proteínas nos grãos sem glúten diminui a formação do *hot break*.⁵ Esse fenômeno está ligado à precipitação de proteínas e polifenóis (como os taninos) dissolvidos no mosto, resultando na criação de flocos visíveis ou de uma espuma densa que se separa do líquido.⁶ Como resultado da menor presença de proteínas, a estabilidade da espuma na cerveja final fica comprometida. Para solucionar essa limitação, é possível adicionar aditivos naturais, como musgo irlandês ou proteínas vegetais estabilizantes, que auxiliam na formação e manutenção da espuma.⁷

Durante a fermentação, observam-se diferenças relevantes entre o desempenho da levedura em mostos tradicionais e em mostos formulados com grãos sem glúten. Nos mostos convencionais, há uma composição mais rica em nutrientes essenciais ao metabolismo da levedura, como aminoácidos livres, peptídeos, vitaminas e minerais, entre os quais o zinco se destaca por atuar como cofator enzimático em diversas vias fermentativas.⁸ Por outro lado, os grãos alternativos utilizados na produção de cervejas sem glúten apresentam teores significativamente menores desses compostos, o que pode resultar em uma fermentação menos eficiente, impactando diretamente o teor alcoólico,

aumentando o tempo de fermentação e reduzindo a formação de ésteres e álcoois superiores, fundamentais para o perfil sensorial da bebida.⁹

Além disso, o desequilíbrio na fermentação pode deixar um sabor residual adocicado, além de afetar negativamente o corpo e o equilíbrio sensorial do produto final.⁴ Portanto, a compreensão da composição nutricional do mosto sem glúten e a aplicação de estratégias corretivas, como a suplementação com fontes de nitrogênio assimilável, sais minerais e vitaminas, são essenciais para garantir a qualidade fermentativa e o padrão sensorial esperado.¹⁰ A verificação da ausência de glúten é geralmente realizada por métodos analíticos, como o ELISA-R5, e o produto final deve atender aos critérios estabelecidos por regulamentações internacionais, que exigem teores inferiores a 20 ppm de glúten para que a cerveja possa ser rotulada como “sem glúten”.¹¹

Em contraste, na produção de cervejas convencionais, o processo é mais padronizado e consolidado, com etapas otimizadas para o uso de malte de cevada e menor necessidade de ajustes enzimáticos ou correções nutricionais.¹² Por outro lado, a produção de cerveja sem glúten, apesar dos desafios técnicos, representa uma alternativa viável e em expansão, especialmente para atender consumidores celíacos ou sensíveis ao glúten, ainda que com custo de produção mais elevado e possíveis alterações no perfil sensorial da bebida.¹³

Desse modo, as principais abordagens para obtenção de cervejas sem glúten podem ser divididas em dois grupos: (1) produção a partir de grãos naturalmente isentos de glúten e (2) produção com grãos tradicionais seguida de remoção ou degradação do glúten por métodos enzimáticos ou tecnológicos. Do ponto de vista comercial, a produção de cervejas sem glúten ainda enfrenta desafios logísticos e econômicos, como a necessidade de linhas de produção dedicadas para evitar contaminação cruzada, certificação laboratorial e o uso de insumos especiais, o que eleva o custo final da bebida.¹⁴

Cronologia das pesquisas

Em relação às pesquisas na produção de cerveja sem glúten, é possível afirmar que esta teve seu início com a demanda comercial, impulsionada inicialmente por demandas clínicas e dietéticas, especialmente relacionadas à doença celíaca, e mais recentemente por mudanças no comportamento do consumidor e tendências de alimentação saudável. As primeiras pesquisas sobre substituição do malte de cevada por grãos alternativos remontam às décadas de 1980 e 1990,

período em que as preocupações com a doença celíaca começaram a ganhar atenção na literatura médica e alimentar. Inicialmente, os estudos voltaram-se para a avaliação da toxicidade do glúten em alimentos fermentados e para a possibilidade de utilizar grãos como milho, arroz e sorgo na fermentação alcoólica.⁸

No entanto, esses primeiros experimentos enfrentaram limitações significativas que comprometeram tanto a viabilidade técnica quanto a aceitação sensorial dessas bebidas, uma vez que a baixa eficiência da conversão enzimática representava um dos principais obstáculos, pois os grãos alternativos como milho, arroz e sorgo apresentam baixos teores de enzimas naturais responsáveis pela quebra do amido em açúcares fermentáveis. Isso resultava em mostos com menor fermentabilidade, afetando o rendimento alcoólico da bebida e levando à produção de cervejas com corpo leve e pouco teor de álcool. Ademais, também havia falta de padronização nas matérias-primas utilizadas, o que gerava variações consideráveis na composição nutricional, dificultando o controle de processos como brassagem e fermentação.¹⁵

A análise organoléptica dos consumidores indicou que os produtos frequentemente apresentavam sabores considerados desequilibrados ou desagradáveis, descritos como aguados, com notas herbáceas intensas, ou com um sabor verde, um perfil associado à presença de compostos fenólicos indesejados ou à baixa complexidade de malte.¹⁶ Essa combinação de fatores limitou a aceitação pelo público e dificultou a inserção desses produtos no mercado durante os estágios iniciais da pesquisa e desenvolvimento.

Com o avanço da biotecnologia e o aprimoramento dos processos cervejeiros, o início dos anos 2000 marcou uma nova fase nas pesquisas sobre cervejas sem glúten. A introdução de enzimas exógenas comerciais (como amiloglucosidase e proteases específicas), somada ao desenvolvimento de novas cepas de leveduras tolerantes a substratos incomuns, contribuiu para melhorar a fermentabilidade dos mostos sem glúten.¹⁷

Além disso, estudos começaram a focar na caracterização nutricional e funcional dos grãos alternativos, como quinoa, teff e trigo sarraceno, revelando perfis mais adequados para formulações balanceadas. Nessa fase, surgem também as primeiras iniciativas comerciais na Europa e América do Norte, com rótulos como *gluten-free beer* ou *crafted without gluten*.¹⁸

A partir da década de 2010, as pesquisas passam a se diversificar em duas grandes linhas de desenvolvimento: (i) produção de cervejas a partir de matérias-primas naturalmente isentas de glúten e (ii) degradação do glúten em cervejas convencionais com malte de cevada, usando enzimas específicas como *prolyl endopeptidases* (PEPs).²⁰ Essa segunda abordagem, embora promissora, levantou questões regulatórias e de confiabilidade na detecção de fragmentos tóxicos de glúten, especialmente pelo uso de métodos analíticos como o ELISA-R5, que nem sempre detecta todas as frações imunogênicas.²¹

Além disso, houve importante avanço na compreensão dos impactos sensoriais e fermentativos das cervejas sem glúten, com destaque para o uso de *blends* de grãos, melhoramento genético de matérias-primas e adição de nutrientes e precursores aromáticos para compensar a ausência de compostos típicos do malte de cevada.²²

Nos últimos anos, a pesquisa em cervejas sem glúten tem priorizado a otimização sensorial, escalabilidade industrial e sustentabilidade dos insumos. Iniciativas mais recentes envolvem o uso de tecnologia de fermentação controlada, engenharia genética em leveduras e tecnologias de bioprocessamento enzimático mais eficientes.²³

Além disso, a crescente demanda por produtos sustentáveis e o aumento da conscientização sobre intolerâncias alimentares têm impulsionado inovações no setor, com cervejas artesanais sem glúten ganhando mercado em diferentes países. Ademais, a expansão do portfólio comercial tem estimulado ainda mais pesquisas sobre estabilidade de espuma, corpo da bebida e formação de compostos voláteis comparáveis aos das cervejas tradicionais.²⁴

Métodos analíticos para determinação de glúten na cerveja

Dentre os métodos analíticos mais empregados na indústria e na pesquisa, destacam-se os imunoensaios baseados em anticorpos, como o ELISA-R5 e o ELISA-G12, além de abordagens instrumentais mais avançadas, como a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas (LC-MS/MS) e a reação em cadeia da polimerase (PCR).²⁵

O método ELISA-R5 (*Enzyme-Linked Immunosorbent Assay*), desenvolvido com o anticorpo monoclonal R5, é amplamente recomendado por organismos internacionais como o *Codex Alimentarius*.²⁵ Ele é sensível ao

epítopo QQPFP, tal que este é uma região específica de uma molécula, geralmente um antígeno, que é reconhecido pelo sistema imunológico, especificamente por anticorpos ou células T. Essa sensibilidade é comum em todos os peptídeos do glúten, especialmente nas prolaminas de trigo, centeio e cevada. Ademais, esse método apresenta alta sensibilidade, com limites de detecção abaixo de 5 ppm, e é o mais utilizado na indústria cervejeira, devido à sua padronização e facilidade de execução.²⁶ No entanto, seu desempenho em matrizes fermentadas ou hidrolisadas, como a cerveja, é frequentemente questionado, pois a quebra do glúten durante a fermentação pode gerar fragmentos peptídicos que escapam da detecção do anticorpo R5.²⁷

Uma alternativa é o método ELISA-G12, que utiliza um anticorpo capaz de detectar o epítopo QPQLPY, um fragmento específico do glúten conhecido por provocar respostas imunológicas em pessoas com doença celíaca. Estudos indicam que o ELISA-G12 pode detectar melhor certos fragmentos imunogênicos, inclusive em produtos parcialmente hidrolisados.²⁸ Entretanto, ainda existem controvérsias quanto à equivalência entre os dois métodos e à ausência de consenso internacional sobre qual ensaio melhor representa a toxicidade residual do glúten em matrizes complexas como a cerveja.²⁹

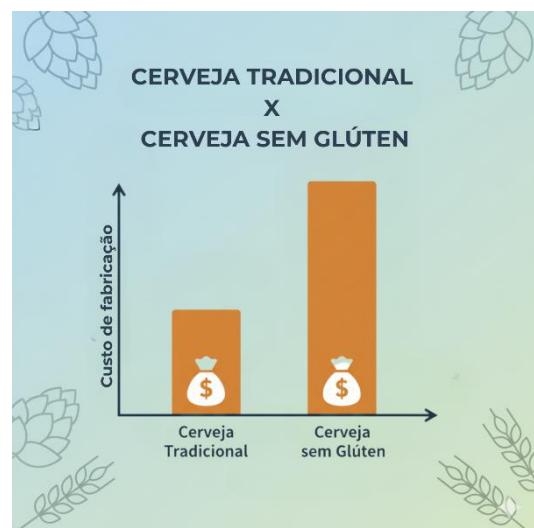
Já a LC-MS/MS (cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em tandem) surge como um método instrumental de alta especificidade e sensibilidade, capaz de identificar e quantificar fragmentos específicos de peptídeos do glúten, mesmo após extensiva degradação.³⁰ Este método permite diferenciar entre fontes de glúten (trigo, centeio ou cevada) e detectar frações que não são reconhecidas por anticorpos tradicionais. No entanto, sua aplicação é limitada pelo alto custo, necessidade de equipamentos sofisticados e pessoal altamente treinado.

Por fim, a PCR (reação em cadeia da polimerase), embora útil para a detecção de material genético de cereais que contêm glúten, não é recomendada para produtos fermentados como a cerveja, uma vez que o DNA frequentemente se degrada durante o processo de fermentação. Isso pode levar a falsos negativos ou à subestimação da presença de glúten.³¹

Portanto, ainda que o ELISA-R5 permaneça o método de escolha para fins regulatórios e comerciais, especialmente por sua padronização e ampla aceitação internacional, há uma crescente demanda por métodos complementares, como a LC-MS/MS, que ofereçam maior precisão na detecção de

fragmentos potencialmente imunogênicos em matrizes fermentadas. A escolha do método ideal deve considerar o objetivo da análise, o tipo de matriz, os custos envolvidos e as exigências legais do mercado alvo.³² Na Figura 1 é apresentado um comparativo do custo de produção de cerveja com e sem glúten.

Figura 1. Comparativo custo de produção cerveja com e sem glúten. Fonte: Autoral.



Conclusões

Essa revisão apresentou os principais aspectos contidos na literatura acerca da produção de cerveja sem glúten. Além disso, evidenciou a necessidade de estudos adicionais voltados à redução dos custos de fabricação desses produtos, em comparação às cervejas tradicionais. Também foi identificado uma escassez em métodos analíticos eficazes e de baixo custo. Além dos desafios como a estabilidade da espuma e corpo da cerveja ainda são problemas que parecem ser de difícil resolução. Logo, os consumidores que possuem intolerância a glúten ou doença celíaca devem estar atentos a precedência das bebidas se desejarem consumir, haja vista que a legislação brasileira não é muito clara a respeito dos aspectos técnicos e nutricionais que esses produtos devem possuir.

Contribuições por Autor

G. S. M., B., e S. R. R. J., M. M. M. conduziram a pesquisa e a redação inicial; D. S. M. realizou a análise de dados e elaboração de figuras; G. S. M. e G.F.G. coordenaram o projeto e revisaram o manuscrito.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis (LMCERVA) da Universidade de Brasília pelo suporte técnico e infraestrutura. Agradecem também às agências de fomento pelo apoio financeiro.

Referências

- 1 A. Van Landschoot, *Cerevisia*, 2011, **36**, 93–97.
- 2 H. K. Mayer, *Food Chem.*, 2016, **210**, 96–103.
- 3 M. Rakovic, *Food Technol. Biotechnol.*, 2018, **56**, 494–504.
- 4 D. E. Briggs, *Brewing: Science and Practice*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2004.
- 5 H. Zhao, *J. Inst. Brew.*, 2012, **118**, 313–320.
- 6 W. Kunze, *Technology Brewing & Malting*, 5th edn, VLB Berlin, Berlin, 2014.
- 7 R. F. Alves, *Trends Food Sci. Technol.*, 2022, **120**, 1–9.
- 8 C. P. Kurtzman, in *Yeasts in Food and Beverages*, ed. G. H. Fleet, Springer, 2012.
- 9 A. E. Hill, *J. Cereal Sci.*, 2009, **50**, 495–501.
- 10 H. Zhao, *J. Inst. Brew.*, 2012, **118**, 313–320.
- 11 H. K. Mayer, *Food Chem.*, 2016, **210**, 96–103.
- 12 A. Munguia, *Food Chem.*, 2019, **274**, 203–209.
- 13 C. W. Bamforth, *Beer: Tap into the Art and Science of Brewing*, 3rd edn, Oxford University Press, Oxford, 2009.
- 14 T. Brányik, *J. Food Eng.*, 2012, **108**, 493–506.
- 15 A. S. Hager, J. P. Taylor, D. M. Waters and E. K. Arendt, *Trends Food Sci. Technol.*, 2014, **36**, 44–54.
- 16 A. De Meo, S. L. Freeman, O. Marconi, G. Perretti and P. Fantozzi, *LWT - Food Sci. Technol.*, 2011, **44**, 1376–1381.
- 17 H. K. Mayer, M. Arnolds and E. Buehler, *Brew. Sci.*, 2017, **70**, 25–36.
- 18 E. F. Vieira, O. Pinho and I. M. P. L. V. O. Ferreira, *Curr. Nutr. Food Sci.*, 2019, **15**, 214–228.
- 19 B. S. E. Elzain and A. F. Mustafa, *J. Food Prod. Mark.*, 2018, **24**, 322–335.
- 20 M. L. Colgrave, H. Goswami and C. A. Howitt, *J. Agric. Food Chem.*, 2017, **65**, 9506–9515.
- 21 T. Thompson, *J. Am. Diet. Assoc.*, 2009, **109**, 1584–1586.
- 22 M. Zdaniewicz, A. Pater and P. Satora, *J. Inst. Brew.*, 2020, **126**, 30–39.
- 23 S. Ramakrishnan and S. N. Gummadi, *Biotechnol. Prog.*, 2021, **37**, e3087.
- 24 J. Silva, R. Lopes and J. Teixeira, *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2023, **22**, 1785–1802.
- 25 Codex Alimentarius Commission, *Standard for Foods for Special Dietary Use for Persons Intolerant to Gluten*, Codex Stan 118-1979.
- 26 E. Méndez, C. Vela, U. Immer and F. W. Janssen, *Eur. J. Gastroenterol. Hepatol.*, 2005, **17**, 1053–1063.
- 27 M. L. Colgrave, H. Goswami and C. A. Howitt, *J. Agric. Food Chem.*, 2017, **65**, 9506–9515.
- 28 B. Morón, M. T. Bethune, I. Comino *et al.*, *J. Agric. Food Chem.*, 2008, **56**, 6857–6863.
- 29 L. K. Allred, C. Ritter, S. Vielhaber *et al.*, *Food Chem.*, 2020, **327**, 127045.
- 30 J. A. Sealey-Voysner, J. Zweigenbaum, R. D. Voysner *et al.*, *J. AOAC Int.*, 2010, **93**, 200–206.
- 31 Z. Bugyi, K. Török, L. Hajas *et al.*, *Food Control*, 2013, **33**, 385–390.
- 32 K. A. Scherf, R. E. Poms and P. Koehler, *J. Cereal Sci.*, 2016, **67**, 112–122.

Estratégias de produção de cervejas com baixo teor de carboidratos e aprovação diabética

DOI: 10.5281/zenodo.17507241

Sara Oliveira de Teixeira de Moraes,^a Mariana Moura Moutinho,^b Thiago Antonio da Fonseca,^a Vitória Domenick G. R. M. Trovão,^a Igor Murilo Teixeira Rodrigues,^b e Grace Ferreira Ghesti^{b*}

The growing market for diabetic-friendly beers has driven the development of innovative brewing techniques to reduce residual carbohydrates. This study explores strategies for producing low-carbohydrate beers, including the use of alternative grains, cold mashing, isothermal mashing, and genetically modified yeasts. The results demonstrated that replacing traditional barley malt with sorghum reduces fermentable sugars, as does the cold mashing method; isothermal mashing produces beers with <0.75% residual sugars; and modified *Saccharomyces cerevisiae* yeast strains improve the handling of the non-fermentable sugar dextrin.

O crescente mercado de cervejas adequadas para diabéticos tem impulsionado o desenvolvimento de técnicas inovadoras de produção para reduzir carboidratos residuais. Este estudo investiga estratégias para a produção de cervejas com baixo teor de carboidratos, incluindo o uso de grãos alternativos, mosturação a frio, mosturação isotérmica e leveduras geneticamente modificadas. Os resultados demonstraram que a substituição do malte de cevada tradicional por sorgo reduz os açúcares fermentáveis, assim como o método de mosturação a frio; a mosturação isotérmica produz cervejas com <0,75% de açúcares residuais; e linhagens modificadas de *Saccharomyces cerevisiae* melhoraram o processamento da dextrina, um açúcar não fermentável.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

^bUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Química (IQ/UnB), Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis.

*E-mail: labccerva@gmail.com

Palavras-chave: cerveja; diabetes; carboidratos residuais; brassagem a frio; leveduras modificadas.

Recebido em 20 de agosto de 2025,

Aprovado em 29 de outubro de 2025,

Publicado em 03 de novembro de 2025.

Introdução

A cerveja é uma das bebidas alcoólicas mais consumidas no mundo. Entretanto, seu consumo exige cautela em um contexto de saúde global onde a prevalência de condições metabólicas é crescente.

De acordo com o *International Diabetes Federation (IDF) Diabetes Atlas* (2025), estima-se que 589 milhões de adultos (1 em cada 9) viviam com diabetes em 2024. Para esses indivíduos, o consumo de cerveja tradicional pode exigir cautela devido ao teor de carboidratos e ao consequente impacto na glicemia.^{1,2}

Respondendo a essa demanda, o mercado de produtos funcionais tem se expandido significativamente. O mercado global de cervejas com baixo teor de carboidratos ("low-carb"), por exemplo, atingiu 9,8 bilhões de dólares em 2024 e é impulsionado pela maior conscientização dos consumidores sobre saúde.³ Esse cenário tem impulsionado o desenvolvimento de formulações com baixo ou nenhum teor de carboidratos.

O desafio tecnológico reside no processo cervejeiro tradicional. Nas cervejas obtidas por métodos convencionais, a mosturação converte o amido dos grãos (majoritariamente cevada) em açúcares fermentáveis, como maltose e maltotriose. Durante a fermentação, esses açúcares são metabolizados pelas leveduras, produzindo etanol e dióxido de carbono. Contudo, uma fração de carboidratos complexos, como as dextrinas, não é totalmente fermentada e permanece na bebida como carboidratos residuais. São esses açúcares residuais que podem contribuir para o aumento da glicemia em pessoas com diabetes.⁴

Em contrapartida, as cervejas com baixo impacto glicêmico apresentam teor de açúcares residuais reduzido ou totalmente eliminado por meio de estratégias específicas de produção. Entre essas estratégias estão a substituição dos grãos utilizados na malteação, o uso de técnicas de brassagem diferenciadas (como a *cold mash* e a mosturação isotérmica) e o emprego de leveduras com maior capacidade fermentativa, incluindo cepas geneticamente modificadas.⁴⁻⁶

O objetivo deste trabalho é discutir algumas dessas estratégias, destacando métodos para reduzir o teor de carboidratos e viabilizar a produção de cervejas com baixo impacto glicêmico, mais seguras para pessoas com diabetes.

Metodologia

O presente trabalho foi desenvolvido como uma triagem prospectiva, com o objetivo de reunir e discutir evidências científicas sobre estratégias tecnológicas voltadas à redução do teor de carboidratos em cervejas e à produção de bebidas de baixo impacto glicêmico.

A busca bibliográfica foi conduzida nas bases de dados ScienceDirect®, Scopus®, e Google Scholar®, abrangendo o período de 1980 a 2024. Utilizaram-se como descritores, em português e inglês, os termos: “cerveja com baixo teor de carboidratos”, “cerveja para diabéticos”, “*low-carbohydrate beer*”, “*mashing techniques*”, “*isothermal mashing*”, “*cold mash*”, “*brewing yeast*” e “*yeast modification*”.

Foram incluídos artigos originais, revisões e comunicações científicas que abordassem métodos de redução de carboidratos em processos cervejeiros, tais como:

- substituição de grãos tradicionais por alternativas com menor teor de amido;
- aplicação de técnicas diferenciadas de mosturação (*cold mash* e mosturação isotérmica);
- utilização de enzimas exógenas, como glucoamilase;
- e uso de leveduras com alta capacidade fermentativa ou modificadas geneticamente.

Foram excluídos trabalhos sem revisão por pares, publicações voltadas apenas a análises sensoriais e fontes sem detalhamento metodológico.

Após a seleção, os estudos foram analisados de forma descritiva e comparativa, identificando as principais abordagens tecnológicas, suas vantagens e limitações, bem como as perspectivas para a produção de cervejas com menor impacto glicêmico.

Resultados e discussão

A triagem prospectiva evidenciou que diversas estratégias tecnológicas vêm sendo desenvolvidas para reduzir o teor de carboidratos em cervejas, com o objetivo de tornar seu consumo mais seguro para pessoas com diabetes. Dessa

forma, os estudos analisados indicam que as principais abordagens envolvem modificações na composição do mosto, no processo de mosturação e na fermentação. De modo geral, essas estratégias podem ser agrupadas em quatro categorias principais:

- (1) uso de grãos alternativos à cevada tradicional, visando diminuir a proporção de açúcares fermentáveis;
- (2) ajustes nas condições de brassagem, como as técnicas de *cold mash* e mosturação isotérmica;
- (3) adição de enzimas exógenas, que promovem uma conversão mais completa do amido; e
- (4) emprego de leveduras com maior capacidade fermentativa, incluindo cepas geneticamente modificadas.

Nos tópicos a seguir, são discutidos os principais resultados relatados em estudos representativos de cada categoria, destacando-se as vantagens, limitações e potenciais aplicações industriais dessas técnicas.

Uso de grãos alternativos

A cevada é o grão mais tradicionalmente utilizado na malteação para a produção de cerveja. Sua escolha está relacionada à proporção adequada entre amido e proteínas, além da elevada atividade enzimática durante a mosturação. Contudo, nem todos os carboidratos presentes no malte são fermentados, e a presença de açúcares residuais pode ocasionar hiperglicemia em indivíduos com diabetes.¹

A substituição do malte tradicional da cevada por grãos com menor teor de amido é uma alternativa para a produção de cerveja voltada para diabéticos. As opções de substituição que se destacam são sorgo, milho e arroz. O menor teor de açúcares fermentáveis desses grãos favorece a produção de uma cerveja final com menor teor de açúcares residuais.⁷

Pesquisadores do Cazaquistão estudaram a aplicação do sorgo como matéria-prima para a produção de mosto com baixo grau de digestão, ou seja, baixa proporção de açúcares fermentáveis, como maltose, glicose e maltotriose.⁴ O trabalho analisou a resposta de duas variedades de sorgo como matéria-prima não malteada, combinadas com malte Pilsen em diferentes proporções (95:5 até 50:50).

Também foram testadas o efeito de diferentes razões malte/água (de 1:3 a 1:7) e dois regimes de brassagem com temperaturas e pausas específicas para inibir a ação das enzimas amilolíticas. Os resultados indicaram a produção de uma cerveja com apenas 25,89% de açúcares fermentáveis e

79% não-fermentáveis. Como consequência do menor teor de açúcares e menor poder fermentativo, o teor alcoólico final estimado foi de até 0,5%. O desenvolvimento do estudo é especialmente interessante para a produção de cervejas de baixo impacto glicêmico.

Brassagem a frio

A técnica de brassagem a frio, do inglês *cold mash*, consiste em realizar a hidrólise enzimática do amido do malte em baixas temperaturas, em torno de 10 °C, por períodos de mosturação mais longos. Essa técnica resulta em uma menor extração de açúcares fermentáveis devido à menor atividade enzimática e em um mosto com menor teor de carboidratos.

Essa técnica é comumente empregada para obtenção de cervejas sem álcool e de baixo teor alcóolico com características sensoriais semelhantes às de cervejas tradicionais e vem sendo recentemente ampliada para a produção de cervejas com teor reduzido de carboidratos.

Diante da busca pela obtenção de um mosto cervejeiro com baixo teor de carboidratos, o grupo de pesquisa Dalberto; Niemes; Da Rosa propuseram um estudo da composição e das características físico-químicas do mosto cervejeiro com a técnica de *cold mash*.⁵

O estudo concentrou-se apenas na etapa de brassagem (*mashing*), sem incluir lúpulo, fermentação ou maturação.

Foram utilizados maltes Pilsner e Caraamber. A técnica de *cold mash* foi aplicada em diferentes condições de tempo (12 e 24 horas) e temperatura (7 °C e 9 °C), e os mostos obtidos foram analisados quanto a cinco parâmetros físico-químicos: teor de extrato (°Bx), pH, acidez total, cor (EBC) e teor de proteínas.

Foi utilizado também um planejamento fatorial 2² para investigar a significância dos fatores. Com isso, obteve-se um teor de extrato que variou de 5,0 a 6,8 °Bx, sendo valores inferiores ao mosto tradicional (11-12 °Bx), indicando menor concentração de carboidratos e menor teor alcóolico.⁵

Brassagem isotérmica

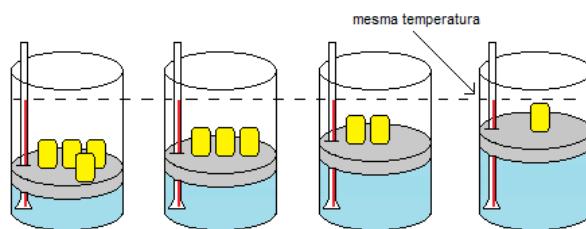
Diferentemente da brassagem a frio, a mosturação isotérmica, do inglês *isothermal mashing*, busca otimizar a hidrólise enzimática a temperaturas de 70 °C, com a adição de glucoamilase. A glucoamilase é uma enzima que hidrolisa tanto ligações α -1,4 quanto β -1,6 em carboidratos, convertendo-os em glicose e garantindo uma hidrólise total do

amido em açúcares fermentáveis. À temperatura de mosturação constante de 70 °C, há a ação simultânea das α -amilase naturais do malte e da glucoamilase termoestável adicionada.⁶

Um método de preparo eficiente para produzir cervejas com baixo teor de carboidratos por mosturação isotérmica em alta temperatura com a adição de glucoamilase foi proposto por S. L. Matthews.⁷ O estudo realizou mosturações isotérmicas a 70°C com glucoamilase variando pH, teor de cálcio, taxa de ação da enzima e tempo de conversão. Foram avaliados a fermentabilidade real do mosto, perfil de carboidratos, nitrogênio livre e viscosidade. Os resultados obtidos indicaram que houve hidrólise completa dos carboidratos com tempo de mosturação de 90 - 120 minutos.

Além disso, o processo produziu cervejas com menos de 0,75% de carboidratos residuais e teor alcoólico de ~5,5% (v/v), concluindo que a mosturação isotérmica é eficiente para produzir cervejas com baixo teor de carboidratos.

Figura 1. Exemplo de como é o comportamento da pressão e do volume a temperatura constante em uma transformação isotérmica. Extraído da referência 12.



Adição de enzimas exógenas

Uma das estratégias tecnológicas mais estabelecidas e eficientes para a redução de carboidratos residuais, muitas vezes combinada com as outras abordagens citadas, é o uso de enzimas exógenas.

Conforme mencionado, o processo de mosturação tradicional deixa uma fração significativa de carboidratos não fermentáveis, principalmente dextrinas, devido à incapacidade das enzimas naturais do malte (α e β -amilases) de hidrolisar as ligações α -1,6 da amilopectina. Para solucionar isso, a indústria utiliza enzimas microbianas que promovem uma sacarificação (quebra de amido) muito mais completa.

A principal enzima empregada é a amiloglucosidase (AMG), ou glucoamilase. Sua vantagem crucial é a capacidade de hidrolisar tanto as ligações α -1,4 (lineares) quanto as ligações α -1,6 (pontos de ramificação). A AMG atua

sequencialmente nas extremidades das moléculas de dextrina, quebrando-as completamente em unidades de glicose, um açúcar 100% fermentável. O resultado é um mosto com altíssimo grau de fermentabilidade.⁹

Para otimizar a eficiência, a AMG é frequentemente usada em sinergia com a pululanase, uma enzima desramificadora que ataca especificamente as ligações α -1,6. A pululanase possibilita uma abertura na estrutura das dextrinas complexas, facilitando o acesso da AMG e das α -amilases às cadeias lineares, acelerando a conversão total.

A aplicação dessas enzimas (seja na mosturação, como no método isotérmico, ou até mesmo na fermentação) permite a produção de cervejas com atenuação quase total, resultando em produtos com teor de carboidratos residuais mínimo, ideal para o público diabético, embora também resulte em um teor alcoólico proporcionalmente maior, se o extrato inicial não for ajustado.

Leveduras com elevada capacidade fermentativa

O uso de leveduras com elevada capacidade fermentativa também é uma estratégia a ser explorada na produção de cervejas com baixo teor de carboidratos.

Espécies como *Saccharomyces pastorianus*, utilizadas em cerveja do tipo Lager, e cepas selecionadas de *Saccharomyces cerevisiae* são comumente empregadas diante da sua alta atenuação aparente, ou seja, à sua capacidade de fermentar grande parte dos açúcares presentes no mosto.

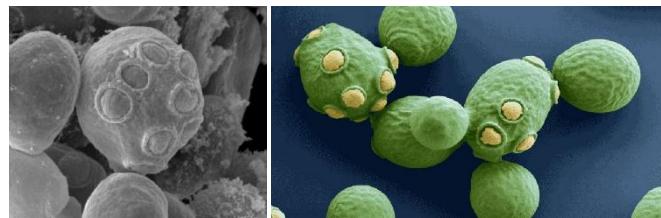
Ensaios recentes também exploram o uso de leveduras geneticamente modificadas para metabolizar açúcares normalmente não fermentáveis, como a dextrina.¹⁰

Um estudo de Park *et al.*, propôs a modificação genética de leveduras *Saccharomyces cerevisiae* para torná-las capazes de degradar completamente a dextrina, um dos principais açúcares não fermentáveis presentes no mosto cervejeiro durante a etapa de fermentação. Para isso, foram inseridos na *S. cerevisiae*, o gene GAM1 de outra espécie de levedura *Debaryomyces occidentalis*, capaz de romper as ligações α -1,6-glicosídicas da dextrina.¹¹

Nos experimentos realizados, foi possível monitorar a atividade das glucoamilases secretadas pelas leveduras por meio de ensaios enzimáticos. Os resultados obtidos indicaram que as cepas de *S. cerevisiae* modificadas com o gene GAM1 foram capazes de degradar completamente dextrina e isomaltose,

dois carboidratos tipicamente não fermentáveis. Essa modificação representa um avanço para a produção de cervejas com baixo teor de carboidratos, indicada para pessoas com diabetes.

Figura 2. Levedura da espécie *Saccharomyces cerevisiae* para exemplificar a morfologia desses fungos. Extraído das referências 13 e 14.



Conclusão

A produção de cervejas com baixo teor de carboidratos representa um campo promissor dentro da tecnologia cervejeira, especialmente diante da crescente demanda por produtos voltados a pessoas com restrições metabólicas, como o diabetes.

A revisão realizada permitiu identificar quatro abordagens tecnológicas principais capazes de reduzir o teor de açúcares residuais e, consequentemente, o impacto glicêmico da bebida:

- (1) a substituição de grãos tradicionais, como a cevada, por matérias-primas com menor teor de amido, como sorgo, milho e arroz, que são base para a produção de cervejas sem glúten;
- (2) a aplicação de técnicas de mosturação diferenciadas, como a *brassagem a frio*, que limita a atividade enzimática e reduz a formação de açúcares fermentáveis;
- (3) o uso de mosturação isotérmica com adição de glucoamilase, que favorece a conversão completa do amido e a fermentação mais eficiente; e
- (4) a seleção de leveduras com alta capacidade fermentativa ou modificadas geneticamente, capazes de metabolizar carboidratos normalmente não fermentáveis, como a dextrina.

Em conjunto, essas estratégias demonstram que é possível obter cervejas com baixo teor de carboidratos sem comprometer as características sensoriais tradicionais, desde que se estabeleça um equilíbrio entre composição de grãos, condições de mosturação e perfil fermentativo das leveduras.

Além de ampliar as possibilidades de consumo para o público diabético, essas inovações contribuem para a diversificação do setor cervejeiro e para o desenvolvimento de produtos mais saudáveis e tecnologicamente avançados. Futuras pesquisas podem aprofundar a otimização dos parâmetros de processo e avaliar o impacto sensorial e nutricional das formulações obtidas, consolidando o potencial industrial dessas tecnologias.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis (LMCERVA) da Universidade de Brasília pelo suporte técnico e infraestrutura. Agradecem também às agências de fomento pelo apoio financeiro.

Referências

- 1 B. Henderson, *et al.*, *Pract. Diabetes Int.*, 1987, **04**, 283–285.
- 2 INTERNATIONAL DIABETES FEDERATION. *IDF Diabetes Atlas*. Brussels, Belgium: IDF, 2025, **11**.
- 3 DATAINTELO. Low-Carb Beer Market Research Report 2033. 2024.
- 4 A. Kerimbayeva, *et al.*, *East.-Eur. J. Enterprise Technol.*, 2022, **05**, 75–82.
- 5 G. Dalberto, J. P. Niemes and M. R. da Rosa, *Braz. J. Food Technol.*, 2023, **26**.
- 6 KUNZE, Wolfgang. *Technology Brewing and Malting*. Berlin: VLB, 2014, **05**.
- 7 S. L. Matthews, H. Byrne and G. P. Hennigan, *J. Inst. Brew.*, 2001, **107**, 185–194.
- 8 FOX, G. P.; ONLEY-WATSON, K. Sorghum and millet as alternatives to barley in brewing. *Journal of the Institute of Brewing*, 2003, **109**, 113-120.
- 9 MOJSOVIĆ, B.; PEJIN, J.; GRUJIĆ, O. The role of exogenous enzymes in brewing—A review. *Food Industry*, 2019, **30**, 13-20.
- 10 MUDREK, R.; WESOLOJ, M. Genetic modification of *Saccharomyces cerevisiae* yeast for the production of light and dietetic beers: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, **62**, 7028-7043.
- 11 J. Y. Park, *et al.*, *Biotechnol. Lett.*, 2014, **36**, 1693–1699.
- 12 Transformação Isotérmica. *Infoescola*, 2010.
- 13 NASA, Leveduras da espécie *Saccharomyces cerevisiae*. [Foto]. National Aeronautics and Space Administration.
- 14 BUENO, Deyvid. Leveduras como bioestimulantes em plantas [Foto], *Agrotécnico*.

Estudo do reaproveitamento do trub cervejeiro com perspectiva na economia circular

DOI: 10.5281/zenodo.17507453

Foss, V.M.,^a Araújo, E.S.,^a Raposo, G.B.,^a Trovão, V.D.G.R.M.,^a Yasuda, J.S.F.,^a Moutinho, M.M.,^b e Ghesti, G.F.^{b*}

This work explores the utilization of brewer's trub, a solid byproduct generated in large volumes during beer production, focusing on its application in various sectors, including animal feed and cosmetics. Currently, trub is mostly discarded, leading to significant environmental costs. However, due to its rich composition of proteins, hops, yeasts, and phenolic compounds, there's increasing research into ways to repurpose this byproduct to create new products. This study will discuss the challenges and opportunities associated with each approach, as well as emerging technologies that can optimize trub processing and purification for different purposes. The objective is to demonstrate the primary ways to utilize trub including methods for its extraction from the brewing process and the identification of its main compounds.

Este trabalho explora a utilização do trub cervejeiro, um subproduto sólido gerado em grandes volumes durante a produção de cerveja, com foco em sua aplicação em diversos setores, incluindo alimentação animal e cosméticos. Atualmente, o trub é majoritariamente descartado, acarretando custos ambientais significativos. No entanto, devido à sua rica composição em proteínas, lúpulo, leveduras e compostos fenólicos, há um número crescente de pesquisas sobre o reaproveitamento desse subproduto na criação de novos produtos. Este estudo discute os desafios e oportunidades associados a cada abordagem, bem como tecnologias emergentes que podem otimizar o processamento e a purificação do trub para diferentes finalidades. O objetivo é demonstrar as principais formas de utilização do trub incluindo os métodos de extração no processo cervejeiro e a identificação de seus principais compostos.

^aUniversidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Química (IQ/UnB).

^bUniversidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Química (IQ/UnB), Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis.

*E-mail: labccerva@gmail.com

Palavras-chave: Trub; cosmético; lúpulo; xanthohumol.

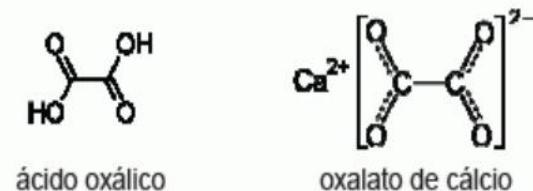
Recebido em 20 de agosto de 2025,
Aprovado em 28 de outubro de 2025,
Publicado em 03 de novembro de 2025.

Introdução

A cerveja é a bebida alcoólica mais consumida mundialmente, tendo os primeiros relatos de seu consumo a mais de 5500 anos atrás em uma cidade pré-histórica chamada Godin Tepe, localizada no atual Irã ocidental, onde foram encontrados vasos com oxalato de cálcio (CaC_2O_4), considerado um produto químico característico da produção de cerveja.¹

Para produzir cerveja é necessário escolher o tipo de grão a se maltear, usualmente, os grãos escolhidos são de cevada. Após os grãos serem malteados, eles são macerados para expor o amido, que é a substância de interesse, e colocado à água quente sob agitação até a formação de uma mistura homogênea, comumente denominada de mosto. Neste momento ocorre a transformação do amido em açúcar. Em seguida, o mosto é filtrado, resfriado e colocado em fermentação com leveduras. Após a fermentação é envasado e guardado.⁷

Figura 1. Estrutura do oxalato de cálcio. Extraído da referência 18.



Dentro da produção de cerveja, alguns resíduos são gerados, como o bagaço cervejeiro, com uma produção estimada de 20 kg para cada 100 litros de cerveja fabricada, a levedura residual, e o Trub, que representa 0.2 a 0.4 kg de resíduo para cada 100 L de cerveja produzida. Esses resíduos apresentam elevado teor de umidade, o que pode provocar o arraste do mosto cervejeiro, prejudicando o rendimento da produção.^{2,3,4,5,6,7,8}

O Trub quente é uma fração sólida formada principalmente por proteínas coaguladas, leveduras mortas,

taninos e resíduos de lúpulo. O aproveitamento desses resíduos é de interesse de toda a comunidade cervejeira por conta do impacto ambiental que é causado pelo descarte incorreto dos componentes. Por conta do avanço da tecnologia, atualmente existem maneiras de reaproveitamento de resíduos, como o do Trub, apesar de possuir poucos relatos de aproveitamento do Trub isolado do bagaço, devido aos diferentes tipos de resíduos deixados por cada um dos estilos de cerveja. O método mais conhecido é o de ração animal, devido a sua concentração de proteínas.²

Com aumento populacional, tendo em vista a geração de resíduos, o presente trabalho surge com o objetivo de explorar o potencial de valorização do trub, um resíduo cervejeiro pouco estudado, visando a sua aplicação como ingrediente para a produção de cosméticos. A crescente busca por novas fontes de matérias-primas obtidas de forma sustentável e responsável para a indústria cosmética tem impulsionado a utilização de ingredientes naturais e orgânicos. O trub se apresenta com grande potencial nesse contexto devido à sua rica composição em proteínas, polifenóis, carboidratos, minerais e ácidos graxos, além de apresentar potencial antioxidante.

Este estudo pretende traçar uma rota de reaproveitamento a partir de uma revisão abrangente da literatura, identificando desafios e oportunidades para a utilização do Trub na cadeia produtiva de cosméticos, contribuindo para a redução de desperdícios e o desenvolvimento de uma economia mais circular e sustentável.⁵

Metodologia

Descrição do Trub

O Trub é um subproduto sólido formado durante o processo de produção de cerveja, resultante principalmente da coagulação de proteínas, resíduos de lúpulo, leveduras e outros compostos insolúveis que se precipitam após a fervura do mosto e durante a fermentação. Ele possui uma rica variedade de compostos orgânicos como terpenos, polifenóis, óleos essenciais e resinas, sendo que alguns desses compostos são responsáveis por dar o amargor da cerveja. Os principais constituintes do Trub são as proteínas, que varia entre 50 a 70% da massa seca, e substâncias amargas do lúpulo que correspondem de 10 a 20% da biomassa.³

Durante o processo de produção de cerveja artesanal realizado na disciplina de fundamentos de produção de cerveja,

ministrada na Universidade de Brasília, no Instituto de Química, após a fervura do mosto da produção e o escoamento do líquido desejado para a fermentação, foi registrada a fotografia apresentada na Figura 1, a fim de verificar a presença do Trub cervejeiro depositado no fundo da panela.

A caracterização do Trub quente é essencial para entender seu potencial de reutilização e para agregar valor a esse resíduo gerado na produção de cerveja. Diversas pesquisas têm investigado de forma aprofundada a composição físico-química e os compostos bioativos presentes no Trub, destacando sua riqueza nutricional e a presença de substâncias com aplicações promissoras nas áreas farmacêutica e cosmética.⁹

Observa-se que esse subproduto é constituído principalmente por água, apresentando níveis de umidade acima de 80%. Apesar disso, a parte sólida do Trub contém componentes relevantes, especialmente proteínas, cuja concentração na massa seca pode variar de 11,44% a 70%. Essa elevada quantidade de proteínas é um dos aspectos que contribui para o valor do Trub em diversas aplicações potenciais.^{2,3,4,5,6,7,8,9}

Figura 2. Exemplo de Trub cervejeiro. Imagem autoral.



Sob a perspectiva dos compostos bioativos, o Trub quente se destaca pela presença significativa de polifenóis e flavonoides. As análises de Compostos Fenólicos Totais (CFT) e flavonoides indicam que, mesmo após o processo de

produção da cerveja, essas substâncias não são perdidas e permanecem no resíduo, podendo ser aproveitadas. A atividade antioxidante do Trub, verificada por métodos como DPPH e ABTS, confirma seu potencial biológico, embora os resultados possam variar conforme o método de extração utilizado e a composição química dos compostos. Além disso, a presença de compostos como o xanthohumol — uma chalcona exclusiva do lúpulo, conhecida por suas propriedades farmacológicas — reforça o valor agregado desse subproduto.⁹

As Tabelas 1, 2 e 3 reúnem os principais dados sobre a caracterização do Trub quente, obtidos a partir de diferentes estudos.

Tabela 1. Caracterização e parâmetros físico-químicos. Dados autorais.

Carboidratos (g/100g)	0,24 ± 0,19
Proteína total (g/100g)	11,44 ± 0,30
Lipídios (g/100g)	0,11 ± 0,01
Fibra total (g/100g)	0,23 ± 0,19
Umidade (%)	87 ± 0,01
Acidez total	21,85 ± 0,54
pH	5,36 ± 0,01
Condutividade elétrica (ms.cm ⁻¹)	1325,33 ± 0,57
Cinzas (%)	0,61 ± 0,01
Sólidos totais (%)	12,40 ± 0,12

Tabela 2. Caracterização e parâmetros físico-químicos. Dados autorais.

Umidade (%)	86,90 ± 0,10
Cinzas (%)	2,00 ± 0,08
Açúcares redutores solúveis (ARS %)	20,0 ± 0,00
Proteína total (%)	48,78
Proteína solúvel (%)	0,88

Principais compostos de interesse

Os compostos com predominância encontrados no Trub e que podem ser aproveitados são as proteínas, utilizados na produção de ração e alimentos, mas comumente utilizado junto ao bagaço do malte e comercializado com produtores de leite e derivados.⁴

Outros compostos relevantes são os polifenóis presentes no Trub, principalmente o xanthohumol, que apresenta propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e antibacteriana. A concentração de xanthohumol é considerada baixa na cerveja, devido a sua baixa solubilização, e por conta disso, a maior parte de sua concentração se encontra no trub.⁵

Tabela 3. Compostos Bioativos, todos em unidade de mg/GAE. ⁻¹ de Trub. Dados autorais.

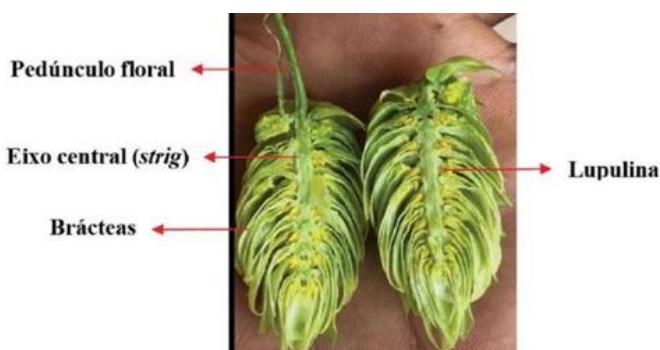
Compostos fenólicos totais (CFT)	0,39 ± 0,01
Flavonoides totais	18,04 ± 0,78
Atividade antioxidante por DPPH	8,57 ± 0,03
Atividade antioxidante por ABTS	0,41 ± 0,01

Os óleos essenciais também são compostos importantes, por serem constituídos basicamente por sesquiterpenos e monoterpeno, o qual esses óleos têm propriedades de repelente contra insetos para aplicações alimentícias.^{3,4,5,6}

Lúpulo

O lúpulo (*Humulus lupulus Linnaeus*) é uma planta da espécie de trepadeira perene, pertencente à família *Cannabaceae*. Na indústria cervejeira, utiliza-se as flores não fertilizadas das plantas fêmeas, as glândulas de lupulina, são encontradas nelas.⁹

Figura 3. Estrutura da flor de lúpulo. Extraído da referência 11.

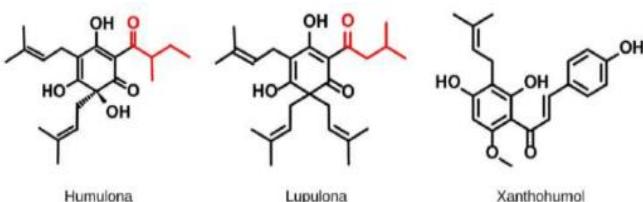


A composição química das flores de lúpulo, considerando 10% de umidade, pode ser dividida em várias frações. As resinas totais (15-30%) são as mais importantes e incluem as resinas macias, que contêm α -ácidos (5-13%) e β -ácidos (3-8%), os principais responsáveis pelo amargor da cerveja. Além disso, há as resinas duras, onde o xanthohumol (0,3-1,5%) é o componente majoritário. Outra fração essencial são os óleos essenciais (0,5-3%), produzidos nas glândulas de lupulina. Compostos principalmente por terpenoides e oxigenados, eles são os responsáveis pelo aroma da cerveja. Já os polifenóis (4%) atuam como antioxidantes naturais, garantindo a estabilidade tanto do mosto quanto da cerveja. O lúpulo também é composto por outros elementos como proteínas (15%), celulose/lignina (43%), ceras, esteroides, cinzas, monossacarídeos, pectinas e aminoácidos.⁴ A Figura 3 demonstra a estrutura da flor de lúpulo antes da utilização na cerveja.

Xanthohumol

O xanthohumol é uma chalcona natural, que se diferencia por ser encontrada exclusivamente no lúpulo. Ele está entre os principais compostos fenólicos encontrados nas resinas do lúpulo, concentrando-se predominantemente nas glândulas de lupulina. Este composto é valorizado por suas diversas propriedades, incluindo ação antioxidant, anti-inflamatória e antibacteriana. Além disso, o xanthohumol é reconhecido como um agente com grande potencial quimiopreventivo contra o câncer.^{3,4,5,6,7} Na figura 4 há a representação molecular das resinas do lúpulo.

Figura 4. Estrutura química dos principais compostos das resinas de lúpulo. Extraído da referência 10.



Métodos e técnicas para aproveitamento do Trub

A principal razão para lidar rapidamente com o Trub assim que ele é gerado na cervejaria está na sua composição: ele contém grande quantidade de proteínas, carboidratos e apresenta um teor de umidade muito elevado (entre 80% e 90%). Essas características criam um ambiente ideal para o crescimento de microrganismos e o início de fermentações indesejadas. Por isso, a forma de conservação adequada tem como objetivo evitar essa atividade biológica, preservando a integridade química de compostos bioativos presentes, como o xanthohumol, de modo que possam ser aproveitados em outras aplicações.²

Uma das formas mais recomendadas de conservar o Trub é por meio do congelamento. Pesquisas indicam que o ideal é congelá-lo logo após a coleta, a uma temperatura de -17 °C, e armazená-lo em sacos apropriados. Esse processo ajuda a interromper de maneira rápida a ação de enzimas e microrganismos, preservando a qualidade do Trub para usos futuros. Quando for utilizá-lo, é importante deixar que descongele lentamente, sem mudanças bruscas de temperatura, para não comprometer os compostos mais sensíveis.⁹

Outro método importante para conservar o Trub é a secagem, que tem como objetivo remover o excesso de umidade. Uma das formas de fazer isso é colocando o Trub em uma estufa com circulação de ar, a uma temperatura baixa, por volta de 40 °C. Esse processo pode durar cerca de 30 horas, até que o peso do material se estabilize. Ao final, o resíduo fica com aproximadamente 25% do peso original quando ainda estava úmido, o que permite que ele seja armazenado em temperatura ambiente sem riscos. Existe também uma alternativa que usa uma estufa a vácuo, a 50 °C, para acelerar a secagem. Além de ajudar a conservar o Trub, a retirada da água também reduz bastante seu volume e peso, tornando mais fácil guardar e transportar o material depois.^{2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14}

Quando o objetivo é reutilizar o Trub rapidamente, como na alimentação animal, ele costuma ser armazenado em bombonas plásticas grandes. Apesar de prático, esse tipo de armazenamento não é muito seguro a longo prazo, já que o Trub, por ser úmido e rico em matéria orgânica, se deteriora facilmente se não for mantido refrigerado. Já em aplicações mais técnicas, como a extração de compostos bioativos para uso na indústria de cosméticos, é comum realizar uma etapa de pré-processamento. Um exemplo é a centrifugação, que ajuda a separar a parte sólida — onde estão os compostos mais valiosos — do líquido restante (o mosto). Isso torna a recuperação dos ingredientes de interesse muito mais eficiente.^{4,5,6,7,8,9}

Técnicas de extração para obter o xanthohumol

Extração Assistida por Ultrassom (EAU): Este método mostrou-se rápido, de baixo custo, com alto desempenho de extração, alta reprodutibilidade, baixo gasto energético e ambientalmente sustentável, mantendo a qualidade da extração mesmo em escala industrial. Esse mecanismo baseia-se no fenômeno da cavitação acústica, que ocorre quando ondas ultrassônicas geram a formação e o colapso violento de microbolhas no solvente ocasionando forças mecânicas capazes de romper as paredes celulares da matriz vegetal, intensificando a transferência de massa e, consequentemente, facilitando a liberação de compostos intracelulares. Além disso, essa técnica promove elevações controladas e localizadas de temperatura e pressão para o aumento da eficiência do processo sem comprometer a integridade de compostos termolábeis.¹²

Para compostos fenólicos como o xanthohumol (XN), os parâmetros que mais influenciam em sua extração são o solvente e a temperatura. O solvente mais comumente utilizado é o etanol, e aumentando sua concentração é possível aumentar o rendimento da reação, mas até o limite máximo, pois após isso pode acarretar efeitos negativos no rendimento, sendo esse limite de concentração de até 90% de etanol. O uso deste solvente é particularmente relevante por sua natureza não tóxica e por sua aprovação em aplicações de grau alimentício, além de apresentar boa polaridade e afinidade com compostos fenólicos como o xanthohumol (XN), tornando-o adequado para extração desses compostos de forma eficiente. A temperatura também é parâmetro importante por ser fator chave na extração de compostos fenólicos, aumentando assim o rendimento da reação, mas caso a temperatura utilizada seja muito elevada, pode acarretar oxidação dos compostos extraídos. Extrações feitas em ultrassom utilizando um

solvente hidroalcoólico chegam a ter 93% de rendimento, conferindo a eficácia do método EAU.^{9,10,11,12,13}

Para realizar a EAU, a biomassa deve estar em temperatura ambiente, para que seja submetido a centrifuga de 3500 rpm por 20 minutos, é um tipo de separação de líquidos em sólidos, a parte sólida será utilizada na extração. Após a separação, utilizando a proporção de sólido/líquido, deve-se utilizar proporções de 1:20 a 3:20 (m/v), o solvente encontrado na literatura como o melhor para extrair foi o etanol e água, sendo considerado um solvente verde, adequado para alimentos. A temperatura ideal da extração é de 30° a 80°C, a temperatura deve ser acompanhada para não ultrapassar e degradar compostos termolábeis. O tempo de sonicação pode variar entre 6 a 180 minutos. A frequência pode variar entre 20 kHz e 40 kHz e em potências variáveis também entre 110 W e 132 W.⁹

Utilização da técnica da EAU com etanol para extrair compostos bioativos de cones de lúpulo secos, empregando condições de 30 min a 25 °C com frequência de 40 kHz, resultando em teores significativos de polifenóis totais.¹² Embora a literatura sobre a extração específica de XN do trub quente seja limitada, esse método foi utilizado focando na extração de compostos fenólicos totais (CFT), que incluem XN. As condições ótimas para essa extração foram razão sólido/líquido de 3/20, concentração de etanol a 90% e temperatura a 60 °C, nessas condições obteve-se um rendimento de 24,13 mg de equivalente de ácido gálico por grama de trub, representando um aumento de cerca de 49 vezes o teor de CFT em comparação com o teor inicial no trub bruto.⁹

Resultados e discussão

O futuro do xanthohumol (XN) é bastante promissor, com possibilidades que vão muito além do que já é feito hoje. A expectativa é que ele se torne cada vez mais valorizado, não só em cosméticos, mas também como ingrediente importante em suplementos, alimentos funcionais e até em medicamentos. Com os consumidores cada vez mais interessados em produtos naturais, com benefícios reais para a saúde e com uma pegada mais sustentável, a busca por novas formas de usar o XN tem crescido. Suas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e de prevenção contra certos tipos de câncer o tornam um forte candidato para o desenvolvimento de suplementos voltados à saúde do coração, prevenção de doenças neurológicas e fortalecimento da imunidade.^{15,16}

Para que o xanthohumol (XN) possa realmente mostrar todo o seu potencial, a pesquisa ainda precisa vencer alguns obstáculos, principalmente relacionados à forma como ele é absorvido pelo corpo. Isso porque ele tem baixa solubilidade em água e não é facilmente aproveitado pelo organismo. Por isso, o foco das próximas pesquisas está no desenvolvimento de novas formas de entrega do composto, como a nanoencapsulação, o uso de lipossomas ou emulsões especiais. Essas tecnologias ajudam a proteger o XN contra a degradação e aumentam sua absorção, tanto pela pele quanto por via oral. Com isso, será possível criar produtos mais eficientes, como séruns de alto desempenho para cuidados com a pele ou suplementos que atuam de forma mais eficaz dentro do corpo.¹⁵

A sustentabilidade deve se tornar um dos principais pilares na produção de xanthohumol. A ideia é adotar um modelo de biorrefinaria, onde a extração do XN a partir de resíduos da produção de cerveja, como o trub, seja apenas o começo de um processo mais amplo de aproveitamento total da biomassa. Esse tipo de abordagem não só torna a produção do composto mais barata e menos agressiva ao meio ambiente, como também fortalece o conceito de economia circular — em que nada é desperdiçado. Além do xanthohumol, outros coprodutos podem ser desenvolvidos a partir do mesmo material, aumentando o valor do que antes seria descartado. Isso beneficia toda a cadeia produtiva, desde as cervejarias até os consumidores, com soluções mais sustentáveis e economicamente viáveis.⁹

Para que o xanthohumol (XN) realmente ganhe espaço no mercado, será essencial contar com respaldo científico e aprovação dos órgãos reguladores. Embora os resultados em testes de laboratório e com animais sejam bastante promissores, o próximo passo é realizar estudos clínicos bem estruturados com seres humanos, que comprovem de forma clara os benefícios do XN para a saúde e a pele. Ter essa base científica sólida será fundamental não só para justificar o que é prometido nas embalagens e campanhas publicitárias, mas também para conquistar a confiança do público e conseguir a liberação para o uso do composto em produtos terapêuticos e cosméticos de alta performance. Com essas validações, o xanthohumol tem tudo para se firmar como um ingrediente essencial em tratamentos de pele — ajudando em casos como acne e manchas — e em fórmulas anti-idade e de proteção contra os danos do sol.^{15,16,17}

Conclusões

O Trub cervejeiro revelou ter um elevado potencial como fonte de biomoléculas de interesse industrial, principalmente para o setor cosmético e farmacêutico. Em sua fração sólida apresenta teores expressivos de proteínas, compostos fenólicos, flavonoides, carboidratos e ácidos graxos, os quais demonstram atividade antioxidante, anti-inflamatória e antimicrobiana. Entre os compostos bioativos identificados, destaca-se o xanthohumol, chalcona exclusiva do lúpulo, cuja concentração é significativamente maior no Trub em comparação à cerveja final, devido à sua baixa solubilidade em aquos.

A Extração Assistida por Ultrassom (EAU), especialmente utilizando etanol solvente, demonstrou-se uma técnica promissora para a recuperação de compostos fenólicos a partir do Trub, apresentando elevado rendimento, baixo impacto ambiental e compatibilidade com escalonamento industrial. Tais características reforçam a viabilidade de resíduos da cadeia cervejeira.

As perspectivas futuras para o aproveitamento do Trub e, em particular, do xanthohumol, dependem do avanço de tecnologias que aumentem sua estabilidade, biodisponibilidade e eficácia, como encapsulação lipossomal e nano emulsões. Paralelamente, são necessários estudos clínicos e toxicológicos robustos que respaldam a segurança e a eficácia desses compostos em aplicações cosméticas e terapêuticas. Dessa forma, a valorização do Trub por meio de estratégias de reaproveitamento tecno-científico se configura como uma alternativa promissora para a promoção da economia circular, agregando valor a resíduos agroindustriais e contribuindo para o desenvolvimento sustentável da cadeia produtiva da cerveja.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradecemos ao Departamento de Química da UnB pelo suporte laboratorial e aos colegas do grupo de pesquisa pelas discussões técnicas enriquecedoras.

Referências

- 1 SeTIC-UFSC, Prof. Dr. Alfredo A. Muxel, <https://amuxel.paginas.ufsc.br/2018/08/>, (accessed November 1, 2025).

- 2 T. R. S. Mathias, P. P. M. D. Mello and E. F. C. Servulo, in *Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, Editora Edgard Blücher, Florianópolis, Brasil, 2015, 3805–3812.
- 3 J. V. P. Pimentel, Valorização do resíduo cervejeiro a partir da pirólise: desafios e oportunidades.
- 4 M. Marsarioli, *Identificação e avaliação de geração de resíduos em processo de produção de cerveja em microcervejaria e proposição de reutilização*, 2019.
- 5 M. B. Prado, *Avaliação do trub quente como potencial ingrediente para a produção de cosméticos*, 2021.
- 6 S. Bedini, G. Flamini, J. Girardi, F. Cosci and B. Conti, not just for beer: evaluation of spent hops (*Humulus lupulus L.*) as a source of eco-friendly repellents for insect pests of stored foods, *Journal of Pest Science*, 2015, **88**, 583–592.
- 7 F. D. F. P. Rebello, Produção de cerveja, *Revista Agrogeoambiental*, 2009, 11.
- 8 G. Arantes, S. Da Silva, R. Dutra, A. Drummond e G. Ghesti, UTILIZAÇÃO DO BAGAÇO DE MALTE PARA PREPARAÇÃO DE BIOPLÁSTICOS: UMA PROPOSTA DE ECONOMIA CIRCULAR AO SECTOR CERVEJEIRO, *Química Nova*, 2024, **47**, 1–6.
- 9 G. V. A. Silva, Extração e concentração de compostos bioativos a partir de Trub quente de cervejaria, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.
- 10 A. S. Paguet, A. Siah, G. Lefèvre, S. Sahpaz and C. Rivière, Agronomic, genetic and chemical tools for hop cultivation and breeding, *Phytochemistry Reviews*, 2022, **21**, 667–708.
- 11 R. Durello, L. Silva and S. Bogusz Jr., QUÍMICA DO LÚPULO, *Química Nova*, 2019, **42**, 900–919.
- 12 K. Carbone, V. Macchioni, G. Petrella and D. O. Cicero, Exploring the potential of microwaves and ultrasound in the green extraction of bioactive compounds from *Humulus lupulus* for the food and pharmaceutical industry, *Industrial Crops and Products*, 2020, **156**, 112888.
- 13 C.-Y. Chen, C.-L. Kao and C.-M. Liu, The Cancer Prevention, Anti-Inflammatory and Anti-Oxidation of Bioactive Phytochemicals Targeting the TLR4 Signaling Pathway, *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, **19**, 2729.
- 14 A. M. Lohmann, *Aproveitamento do lúpulo residual na obtenção de extratos de interesse para indústria cervejeira*, Dissertação de Mestrado, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2021.
- 15 E. Oledzka, Xanthohumol—A Miracle Molecule with Biological Activities: A Review of Biodegradable Polymeric Carriers and Naturally Derived Compounds for Its Delivery, *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, **25**, 3398.
- 16 J. Piekara and D. Piasecka-Kwiatkowska, Antioxidant Potential of Xanthohumol in Disease Prevention: Evidence from Human and Animal Studies, *Antioxidants*, 2024, **13**, 1559.
- 17 I. Dymek, A. Apola, J. Źandarek, M. Starek and M. Dąbrowska, Analytical Assessment of the Quality of Dietary Supplements and Cosmetic Products Containing Xanthohumol by Thin-Layer Chromatography Along with the Estimation of Its Antioxidant Potential, *Processes*, 2024, **12**, 2569.
- 18 N. Schore, *Química orgânica: estrutura e função*, Bookman, 4th edn., 2012.

Extração de proteínas do bagaço do malte assistida por mecanoquímica

DOI: 10.5281/zenodo.17507580

João Bueno Nunes,^a Fernanda Leonel,^a Adriana Clara,^a Julia Saemi F. Yasuda,^a Mariana M. Moutinho^a e Grace F. Ghesti^{a*}

Brewer's spent grain (BSG), a significant residue from beer production, is rich in proteins (20–30%) and fibers, but its high moisture content makes it highly perishable and often discarded. This study evaluated the mechanochemically assisted extraction of proteins from BSG using liquid-assisted grinding (LAG) and sodium carbonate-assisted grinding (SAG) in a ball mill, comparing these to conventional alkaline extraction with sodium hydroxide. Proteins were quantified by UV–Vis spectroscopy (Bradford assay) and characterized structurally by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and thermally by differential scanning calorimetry (DSC). The mechanochemical methods achieved yields of 63% (LAG) and 95% (SAG), which surpassed the 83% obtained with the traditional method. Furthermore, these methods resulted in reduced energy consumption and eliminated the need for concentrated alkaline solutions. These findings demonstrate that mechanochemistry significantly enhances protein recovery from brewer's spent grain, offering a sustainable route for its use in food and nutraceutical applications.

A borra de cerveja (BSG) é um subproduto significativo da produção cervejeira, rico em proteínas (20–30%), fibras (35–45%) e micronutrientes, mas sua alta umidade a torna perecível e muitas vezes descartada. Este estudo avaliou a extração de proteínas da BSG assistida mecanicamente por moagem assistida por líquido (LAG) e moagem assistida por carbonato de sódio (SAG) em um moinho de bolas, comparando-a à extração alcalina convencional com hidróxido de sódio. As proteínas foram quantificadas por espectroscopia UV–Vis (ensaio de Bradford) e caracterizadas por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e calorimetria exploratória diferencial (DSC). Os métodos mecanoquímicos alcançaram rendimentos de 63% (LAG) e 95% (SAG), superando os 83% obtidos com o método tradicional. Além disso, houve redução do consumo de energia e eliminação da necessidade de soluções alcalinas concentradas. Esses resultados demonstram que a mecanoquímica melhora significativamente a recuperação de proteínas da borra de cerveja, oferecendo uma rota sustentável para aplicações alimentícias e nutracêuticas.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: labccerva@gmail.com

Palavras-chave: Malte; mecanoquímica; proteína.

Recebido em 20 de agosto de 2025,

Aprovado em 28 de outubro de 2025,

Publicado em 03 de novembro de 2025.

Introdução

Estima-se que, para cada quilograma de bagaço de malte gerado, cerca de 142 a 310 gramas correspondam a proteínas, o que representa aproximadamente 20% de sua composição.^{1,2} Além do elevado teor proteico, o bagaço é rico em ácidos fenólicos (especialmente os da classe dos ácidos hidroxicinâmicos) conhecidos por suas propriedades antioxidantes e potencial para mitigar os efeitos do estresse oxidativo associado ao excesso de radicais livres.³ Também estão presentes fibras alimentares insolúveis e proteínas que, quando extraídas e hidrolisadas, podem ser aplicadas como aditivos em alimentos funcionais de elevado valor nutricional.

O bagaço de malte possui diversos destinos potenciais, sendo o mais tradicional sua utilização como ração animal (especialmente na alimentação de bovinos), mas também com aplicações documentadas na nutrição de suínos e peixes devido ao seu alto teor de fibras e proteínas.⁴ No que tange ao consumo humano, o bagaço tem sido incorporado em

formulações de alimentos funcionais, como pães, barras de cereais, massas e biscoitos, contribuindo com benefícios fisiológicos importantes. Dentre esses, destacam-se: o aumento do peso fecal, a redução dos níveis séricos de colesterol LDL e a diminuição da incidência de cálculos biliares, efeitos atribuídos principalmente ao conteúdo de fibras insolúveis.^{3,5} Além das aplicações na nutrição, o bagaço de malte também tem sido explorado em processos termoquímicos, como combustão e pirólise, visando à geração de energia térmica ou biocarvão. No entanto, essas rotas tecnológicas, embora energeticamente eficientes, apresentam desvantagens ambientais, tais como a emissão de dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e partículas finas em suspensão, comprometendo a sustentabilidade do processo.⁶ Devido à sua alta concentração de carboidratos estruturais, como celulose (cerca de 15 a 25%) e hemicelulose (19 a 41%), o bagaço de malte também se mostra uma matéria-prima promissora para rotas biotecnológicas avançadas, incluindo a produção de etanol de segunda geração, briquetes de carvão vegetal e até mesmo substrato para produção de papel reciclável.^{1,7}

Conforme destacado no trabalho de Bonifácio-Lopes, diversos métodos têm sido empregados para a extração de compostos de interesse presentes no bagaço de malte, como ácidos fenólicos, beta-glucanas e fibras alimentares. A maioria dessas abordagens requer a aplicação de um pré-tratamento ao resíduo, com o objetivo de romper as estruturas celulares e, assim facilitar o acesso dos solventes aos compostos intracelulares. A etapa de pré-tratamento é particularmente crucial para a recuperação eficiente de ácidos fenólicos, uma vez que esses compostos se encontram predominantemente localizados nos vacúolos celulares e apresentam maior rendimento de extração quando há contato direto com o solvente.⁸ Entre os principais métodos utilizados destacam-se a autohidrólise, que envolve o aquecimento do bagaço a altas temperaturas, a aplicação de ácidos diluídos e a extração alcalina.

Diante desse panorama, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma breve revisão das metodologias mais relevantes descritas na literatura para a extração e purificação de proteínas a partir de resíduos da indústria alimentícia, com ênfase na aplicação dessas técnicas ao processamento do bagaço de malte.

Metodologia

A extração seletiva de proteínas a partir de matrizes não convencionais, como resíduos lignocelulósicos e subprodutos industriais (como, por exemplo, o bagaço de malte), ainda representa um desafio técnico e econômico significativo. Os métodos tradicionais, com destaque para a extração alcalina utilizando hidróxido de sódio (NaOH), são eficazes na solubilização de proteínas estruturais, porém estão associados a uma série de limitações operacionais: alto consumo energético, múltiplas etapas de separação e purificação, uso intensivo de água e solventes, além da necessidade de reagentes químicos agressivos, como solventes orgânicos voláteis e ácidos fortes, que comprometem tanto a viabilidade econômica quanto a sustentabilidade ambiental do processo.⁹

Em um dos estudos avaliados, os pesquisadores realizaram a extração de proteínas da gramínea roxa (*Molinia caerulea*) através de metodologias que aproveitam a mecanoquímica como técnica de pré-tratamento. Foram comparadas duas estratégias distintas de Extração Assistida por Mecanoquímica (do inglês, MAE): moagem assistida por líquido (LAG), utilizando pequenas quantidades de solvente durante a Trituração; e moagem assistida por carbonato de sódio

(SAG), em que o sal atua como uma base fraca, favorecendo a solubilização das proteínas durante o processo mecânico.⁹

Como controle experimental, duas variantes do método alcalino convencional foram utilizadas: a extração com NaOH a 75°C, em uma concentração de 0,125 mol.L⁻¹, simulando uma condição intensiva; e a extração sob condições brandas, também com NaOH, a 0,1 mol.L⁻¹, à temperatura ambiente (aproximadamente 20°C), com o intuito de avaliar a eficiência com menor consumo energético.

A quantificação das proteínas extraídas foi realizada por espectrofotometria UV-Vis, empregando o método de Bradford, (baseado na interação do corante azul de Coomassie G-250 com proteínas), com leitura a 595 nm, técnica amplamente utilizada por sua alta sensibilidade, simplicidade e baixo custo. Além disso, os materiais utilizados foram analisados por microscopia eletrônica de varredura antes e depois das extrações para verificação da topologia e morfologia da superfície do material. Ademais, as proteínas liofilizadas foram submetidas a análises de suas estruturas químicas por espectroscopia do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e calorimetria exploratória diferencial (DSC) para determinação das propriedades térmicas das proteínas obtidas. Após variações nas condições de extração, os pesquisadores chegaram à conclusão que as condições necessárias para a extração mais eficiente são 30 min de moagem, em um moinho de bolas, a 600 rpm com uma razão material/solvente de 30 mg/ml.

Os resultados demonstraram que a aplicação da moagem assistida por líquido (LAG) resultou na extração de 63% do total de proteínas presentes na biomassa vegetal. Quando o processo foi combinado com a adição de carbonato de sódio, o rendimento proteico aumentou significativamente, atingindo 95%. Esse valor supera o obtido pelo método convencional de extração alcalina com hidróxido de sódio, que apresentou um rendimento de 83%.

No estudo conduzido por Olalere e colaboradores, foi avaliada a viabilidade da extração, precipitação e recuperação de proteínas comestíveis a partir da microalga *Chlorella sorokiniana*, utilizando um método mecanoquímico baseado exclusivamente em moagem por moinho de bolas. A proposta visou oferecer uma alternativa sustentável aos processos convencionais de extração, os quais normalmente requerem etapas com alto consumo energético ou o uso de solventes tóxicos.

A biomassa seca da microalga foi submetida à moagem em meio aquoso, sem a adição de reagentes químicos, sob diferentes condições de carga, velocidade e tempo de moagem. As partículas resultantes foram então tratadas por centrifugação para separação do extrato proteico, seguida pela precipitação e recuperação das proteínas para posterior quantificação.

Os autores relataram que a moagem mecânica promoveu um rompimento celular de aproximadamente 52,7%, permitindo a extração de até 97,8% da proteína total presente na biomassa, com rendimento de 618 kg de proteína a partir de 2 toneladas de biomassa seca. O consumo energético do processo foi estimado em apenas 0,83 MJ/kg, significativamente inferior ao de técnicas convencionais, como a homogeneização de alta pressão.¹⁰

A ausência de solventes orgânicos ou reagentes químicos agressivos, a elevada eficiência de recuperação proteica, a expressiva redução no consumo energético e o potencial de escalabilidade industrial (demonstrado pela aplicação do processo em lotes de até duas toneladas de biomassa) estão entre as principais vantagens destacadas pelos autores. Em síntese, o estudo evidenciou que a abordagem mecanoquímica representa uma alternativa eficiente, sustentável e tecnicamente viável para a obtenção de proteínas comestíveis a partir de microalgas, com aplicações promissoras na indústria alimentícia e na formulação de ingredientes funcionais.¹⁰

Outro diferencial importante do método mecanoquímico é sua viabilidade em larga escala. Esse estudo demonstrou a possibilidade de processar até duas toneladas de biomassa em condições operacionais controladas, o que reforça o potencial de aplicação industrial da técnica. Essa característica é particularmente relevante quando se considera o processamento de resíduos agroindustriais de alto volume, como o bagaço de malte, cujas quantidades geradas frequentemente inviabilizam o uso de técnicas onerosas ou que demandem reagentes de alto custo.

De modo geral, diversos estudos vêm demonstrando que a mecanoquímica pode representar uma alternativa promissora aos métodos convencionais de extração de proteínas, especialmente no contexto da valorização de biomassas não convencionais e resíduos agroindustriais. Enquanto os métodos tradicionais envolvem a solubilização das proteínas em meios alcalinos (geralmente com NaOH ou KOH) ou por via enzimática, o método mecanoquímico baseia-

se na aplicação de energia mecânica para promover o rompimento da parede celular e liberação dos constituintes intracelulares.

Diferentemente dos processos químicos, a abordagem mecanoquímica não requer o uso de solventes tóxicos, tampões ou reagentes específicos, sendo conduzida em meio aquoso ou até mesmo em condições totalmente livres de solventes. Tais características reduzem significativamente a geração de resíduos e os custos com tratamento de efluentes, além de tornarem o processo mais simples, seguro e ambientalmente amigável. Essas vantagens fazem da mecanoquímica uma estratégia cada vez mais atrativa no processamento de biomassa vegetal, especialmente por sua eficiência energética, baixo impacto ambiental e compatibilidade com os princípios da química verde.¹¹

Resultados e discussão

A presente revisão evidenciou que o bagaço de malte, subproduto abundante da indústria cervejeira, apresenta elevado potencial para reaproveitamento, sobretudo em função do seu conteúdo residual de proteínas e fibras. Tradicionalmente subutilizado como ração animal ou descartado como resíduo orgânico, esse material pode ser reposicionado como matéria-prima estratégica para a extração de compostos de interesse, alinhando-se aos princípios da economia circular e da valorização de resíduos agroindustriais.

Entre as abordagens investigadas para extração de proteínas, os métodos convencionais baseados em solubilização alcalina ou hidrólise enzimática demonstram eficácia, porém são frequentemente limitados pelo elevado consumo de energia, uso de reagentes agressivos e geração de efluentes, além de apresentarem desafios operacionais em larga escala. Nesse contexto, os métodos mecanoquímicos emergem como alternativas promissoras por utilizarem apenas energia mecânica para promover a ruptura da parede celular, dispensando o uso de solventes tóxicos e reduzindo substancialmente o impacto ambiental do processo.¹¹

Estudos recentes, como o de Olalere *et. al.*⁹ demonstram a viabilidade da mecanoquímica na extração de proteínas comestíveis a partir de biomassa, com elevadas taxas de recuperação proteica e baixo consumo energético, além de terem validado a escalabilidade do processo em lotes de até duas toneladas de biomassa seca. Tais resultados reforçam a aplicabilidade dessa abordagem para outros tipos de biomassa lignocelulósica, como o bagaço de malte, cuja estrutura fibrosa

também exige métodos eficientes de desestruturação da parede celular.

Em síntese, a literatura analisada corrobora o potencial técnico e ambientalmente sustentável da extração mecanoquímica de proteínas aplicável ao bagaço de malte. A consolidação dessa estratégia pode representar um avanço significativo na agregação de valor a esse resíduo, contribuindo tanto para a diversificação de produtos derivados quanto para a mitigação de impactos ambientais associados ao descarte inadequado.

Apesar dos avanços recentes na aplicação da mecanoquímica à extração de biocompostos, importantes lacunas ainda persistem no que diz respeito à utilização dessa técnica em matrizes complexas, como o bagaço de malte. A maior parte dos estudos disponíveis concentra-se em matrizes relativamente simples, como microalgas, sementes ou folhas com baixo teor de lignina, o que limita a extração direta dos dados para substratos mais resistentes e heterogêneos. Nesse sentido, ainda são escassos os trabalhos que explorem, de forma sistemática, as condições ótimas de moagem como tempo, intensidade, umidade e razão sólido-líquido especificamente para a extração de proteínas desse tipo de resíduo agroindustrial.

Outra questão crítica refere-se à influência da estrutura química do bagaço de malte sobre a eficiência da liberação proteica por processos mecanoquímicos. A complexa rede de celulose, hemicelulose e lignina pode dificultar o acesso às frações proteicas internas, sendo necessário avaliar a necessidade (ou não) de pré-tratamentos físicos, térmicos ou enzimáticos integrados à moagem para aumento do rendimento.

Adicionalmente, pouco se sabe sobre a qualidade funcional das proteínas obtidas por mecanoquímica, incluindo seu perfil de aminoácidos, solubilidade, estabilidade térmica e potencial aplicação em formulações alimentícias ou nutracêuticas. Essas características são essenciais para determinar a viabilidade comercial do produto extraído, mas ainda não foram suficientemente investigadas no contexto do reaproveitamento de resíduos sólidos como o bagaço de malte.

Por fim, também se observa uma ausência de estudos em escala piloto ou industrial aplicando a mecanoquímica diretamente à biomassa cervejeira. Embora alguns trabalhos, como o de Olalere e colaboradores, tenham demonstrado a escalabilidade do processo para microalgas, é necessário

validar essa tecnologia em ambientes industriais reais com substratos mais densos, úmidos e variáveis em composição. Portanto, futuras investigações devem buscar responder a essas respostas por meio da adaptação de procedimentos operacionais às características específicas do bagaço de malte, da avaliação detalhada das propriedades das proteínas obtidas e do desenvolvimento de modelos escaláveis e economicamente viáveis para implementação industrial.

Nessa perspectiva, constatamos que aplicação de métodos sustentáveis para o aproveitamento do bagaço de malte apresenta elevada relevância prática, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. Como um dos principais resíduos sólidos gerados na indústria cervejeira, o bagaço é produzido em larga escala e, muitas vezes, descartado de forma inapropriada, apesar de seu alto teor residual de proteínas e fibras. A adoção de estratégias tecnológicas voltadas à sua valorização, como a extração de proteínas por via mecanoquímica, representa uma oportunidade concreta de transformar um passivo ambiental em um recurso funcional.

Do ponto de vista da cadeia produtiva, a recuperação de proteínas do bagaço de malte pode resultar em ingredientes com valor agregado, aplicáveis em formulações alimentícias, suplementos nutricionais, rações animais ou até mesmo em bioproductos industriais, como adesivos ou filmes biodegradáveis. Isso contribui não apenas para a diversificação de produtos derivados da indústria cervejeira, mas também para o fortalecimento de modelos de produção baseados nos princípios da bioeconomia e da sustentabilidade.

Conclusões

Esta revisão analisou os avanços mais recentes relacionados à extração e purificação de proteínas a partir de resíduos da indústria alimentícia, com ênfase no potencial de aplicação da mecanoquímica ao processamento do bagaço de malte. Ao explorar tanto os métodos tradicionais quanto as abordagens emergentes, foi possível evidenciar que a mecanoquímica representa uma alternativa tecnicamente viável, energeticamente eficiente e ambientalmente sustentável para essa finalidade.

Entre as principais contribuições desta revisão, destaca-se a identificação do bagaço de malte como um substrato promissor para valorização proteica, o levantamento das principais vantagens operacionais da mecanoquímica frente às técnicas convencionais, e a identificação de lacunas que ainda precisam ser exploradas para viabilizar sua aplicação.

prática nesse tipo específico de resíduo. Além disso, foram discutidas as condições já testadas em outras biomassas e os desafios associados à adaptação desse processo a materiais mais complexos e heterogêneos, como o bagaço de malte.

Dessa forma, o presente estudo reforça o papel estratégico da ciência na transição para modelos de produção mais ambientalmente responsáveis e contribui para o segmento ao propor um caminho inovador para o aproveitamento do bagaço de malte, um resíduo amplamente disponível e subutilizado, integrando conhecimentos sobre química verde e bioeconomia.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Referências

- 1 S. I. Mussatto, Brewer's spent grain: a valuable feedstock for industrial applications, *J. Sci. Food Agric.*, 2014, **94**, 1264.
- 2 K. M. Lynch, E. J. Steffen and E. K. Arendt, Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health, *J. Inst. Brew.*, 2016, **122**, 553.
- 3 T. Bonifácio-Lopes, J. A. Teixeira and M. Pintado, Current extraction techniques towards bioactive compounds from brewer's spent grain – A review, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 2020, **60**, 2730.
- 4 B. Devnani, G. C. Moran and L. Grossmann, Extraction, Composition, Functionality, and Utilization of Brewer's Spent Grain Protein in Food Formulations, *Foods*, 2023, **12**, 1543.
- 5 A. Jaeger, E. Zannini, A. W. Sahin and E. K. Arendt, Barley Protein Properties, Extraction and Applications, with a Focus on Brewers' Spent Grain Protein, *Foods*, 2021, **10**, 1389.
- 6 A. K. Bhakta, Y. Snoussi, M. El Garah, S. Ammar and M. M. Chehimi, Brewer's Spent Grain Biochar: Grinding Method Matters, *C–J. Carbon Res.*, 2022, **8**, 46.
- 7 M. Arshadi, T. M. Attard, R. M. Lukasik, M. Brncic, A. M. Da Costa Lopes, M. Finell, P. Geladi, L. N. Gerschenson, F. Gogus, M. Herrero, A. J. Hunt, E. Ibáñez, B. Kamm, I. Mateos-Aparicio, A. Matias, N. E. Mavroudis, E. Montoneri, A. R. C. Morais, C. Nilsson, E. H. Papaioannou, A. Richel, P. Rupérez, B. Škrbić, M. B. Solarov, J. Švarc-Gajić, K. W. Waldron and F. J. Yuste-Córdoba, Pre-treatment and extraction techniques for recovery of added value compounds from wastes throughout the agri-food chain, *Green Chem.*, 2016, **18**, 6160.
- 8 M. J. Villalobos-Vega, G. Rodríguez-Rodríguez, O. Armijo-Montes, P. Jiménez-Bonilla and V. Álvarez-Valverde, Optimization of the Extraction of Antioxidant Compounds from Roselle Hibiscus Calyxes (*Hibiscus sabdariffa*), as a Source of Nutraceutical Beverages, *Molecules*, 2023, **28**, 2628.
- 9 O. A. Olalere, F. Guler, C. J. Chuck, H. S. Leese and B. Castro-Dominguez, Mechanochemical extraction of edible proteins from moor grass, *RSC MechanoChem.*, 2024, **1**, 375.
- 10 D. O. Olalere, A. G. F. Stapley and S. Bakalis, Mechanochemical Extraction of Edible Proteins from Chlorella sorokiniana for Sustainable Biorefining, *Mol. Syst. Des. Eng.*, 2024, **9**, 382–394.
- 11 Z. Fang, B. Bhandari, S. K. Johnson and Z. Fang, Recent Developments in Mechanochemical Extraction of Bioactive Compounds – A Review, *Trends Food Sci. Technol.*, 2022, **123**, 87–100.

Valorização do bagaço de malte por conversão em biocarvão e aplicações na cadeia produtiva da cerveja

DOI: 10.5281/zenodo.17507871

Diego Coelho Barroso dos Santos,^{a*} Luana Barbosa Oliveira,^a Guilherme Fonseca Barbosa,^a Mariana M. Moutinho,^a Julia Saemi F. Yasuda,^a Vitoria Domenick G. R. M. Trovão^a e Grace F. Ghesti^a

This theoretical study explores the valorization of brewer's spent grain (BSG) by conversion into biochar for reintegration into the brewing process. Four key applications are proposed: (i) filtration, as a sustainable alternative to diatomaceous earth; (ii) selective adsorption of off-flavor compounds; (iii) low-cost water treatment; and (iv) functional support for enzyme and yeast immobilization. The methodology includes biochar production via pyrolysis or hydrothermal carbonization, followed by activation (physical/chemical) to enhance surface area and functional groups. Standard characterization techniques (BET, SEM, FTIR) are suggested for assessment. This strategy aligns with circular economy principles by converting residues into value-added materials, offering a basis for experimental validation to reduce waste, lower costs, and promote sustainable innovation in brewing.

Este estudo teórico explora a valorização do bagaço de malte (BSG) através da sua conversão em biocarvão para reintegração no processo cervejeiro. Quatro aplicações principais são propostas: (i) filtração, como alternativa sustentável à terra diatomácea; (ii) adsorção seletiva de compostos indesejados (off-flavors); (iii) tratamento de água de baixo custo; e (iv) suporte funcional para imobilização de enzimas e leveduras. A metodologia inclui a produção de biocarvão via pirólise ou carbonização hidrotérmica, seguida de ativação (física/química) para otimizar a área superficial e grupos funcionais. Técnicas de caracterização padrão (BET, SEM, FTIR) são sugeridas para avaliação. Esta estratégia alinha-se aos princípios da economia circular ao converter resíduos em materiais de valor agregado, oferecendo uma base para validação experimental a fim de reduzir resíduos, custos e promover a inovação sustentável na produção de cerveja.

^aUniversidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Química (IQ/UnB), Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis.

*E-mail: santosdcb@gmail.com

Palavras-chave: Valorização; Bagaço de malte (BSG); Biochar; Produção de cerveja; Economia circular.

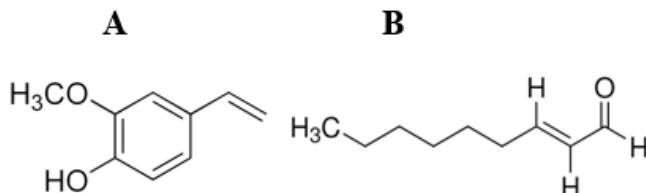
Recebido em 20 de agosto de 2025,
Aprovado em 28 de outubro de 2025,
Publicado em 03 de novembro de 2025.

Introdução

A produção de cerveja artesanal é um processo biotecnológico que integra diversas etapas químicas, térmicas e microbiológicas, envolvendo uma cadeia produtiva complexa e economicamente relevante. Além de representar uma prática cultural e social consolidada, o processo permite a aplicação prática de conceitos fundamentais como balanço de massa, transformações enzimáticas, fermentação alcoólica e análises físico-química.^{1,2} Do ponto de vista técnico, a produção cervejeira é composta por etapas críticas como a brassagem, a fervura, a fermentação, a maturação e o envase, as quais influenciam diretamente as propriedades sensoriais e físico-químicas da bebida final.² A qualidade da água empregada no processo desempenha papel central, afetando diretamente as características sensoriais e a estabilidade da cerveja.³ Impurezas orgânicas ou inorgânicas, variações no pH e a presença de metais ou compostos sulfurados podem comprometer a fermentação, o sabor e a aparência da bebida.⁴

Paralelamente, a formação de *off-flavors* (compostos que conferem sabores ou aromas indesejáveis, como 4-vinilguaiacol e trans-2-nonenal) pode ocorrer ao longo da produção, especialmente em condições inadequadas de fermentação ou envelhecimento, impactando negativamente a aceitação sensorial do produto.⁵ A etapa de filtração também exerce papel fundamental, sendo responsável pela redução de turbidez, remoção de leveduras e outras partículas suspensas, além de contribuir para a estabilidade microbiológica e sensorial da cerveja. O tipo de material filtrante utilizado pode influenciar a eficiência da clarificação e a retenção de compostos desejáveis ou indesejáveis.⁶

Figura 1. Estruturas do (A) 4-vinilguaiacol e (B) trans-2-nonenal. Produzido pelos autores.



Nesse contexto, destaca-se o bagaço de malte (brewer's spent grain – BSG), subproduto lignocelulósico gerado em grandes volumes após a brassagem, composto majoritariamente por fibras vegetais, proteínas e frações residuais de amido.⁷ Durante a brassagem, esse resíduo é separado do mosto por processos de filtração e, geralmente, é destinado à alimentação animal ou descartado. No entanto, sua composição química rica em carbono e funcionalidade superficial torna o BSG um candidato promissor para conversão em biocarvão, um material carbonáceo obtido por pirólise ou processos térmicos relacionados, com estrutura porosa e funcionalidades químicas que permitem aplicações em áreas como adsorção, imobilização de biomoléculas, filtragem e purificação de líquidos.^{8,9}

O presente trabalho tem como objetivo explorar, sob uma perspectiva teórica, a valorização do BSG via produção de biocarvão e sua reinserção na cadeia produtiva da cerveja em aplicações que promovam sustentabilidade, economia circular e inovação tecnológica.

Metodologia

Este trabalho propõe uma abordagem teórica para o reaproveitamento do bagaço de malte (brewer's spent grain – BSG), resíduo lignocelulósico amplamente gerado na indústria cervejeira, por meio de sua conversão em biocarvão (biochar) com potencial aplicação em quatro etapas distintas da cadeia produtiva da cerveja: (i) filtração, (ii) adsorção de compostos indesejáveis, (iii) tratamento de água e (iv) imobilização de biomoléculas. A seguir, detalham-se os métodos sugeridos para produção, caracterização e aplicação desse material.

Produção e caracterização do biocarvão

O BSG deverá ser coletado logo após a brassagem, seco a 105 °C por 24 horas e moído até granulometria inferior a 2 mm. O biocarvão poderá ser obtido por: (a) Pirólise convencional: realizada entre 300 e 700 °C por 30 a 120 minutos em atmosfera de nitrogênio, sendo a temperatura um fator chave na definição da porosidade, funcionalização superficial e estabilidade química do material.¹⁰; (b) Carbonização hidrotermal (HTC): conduzida em reator fechado sob 180–250 °C por 4 a 8 horas, permitindo o uso de biomassa úmida e originando um hidrochar com características distintas.^{11,12}; e (c) Ativações físicas (com CO₂ a 800 °C) ou químicas (com KOH, ZnCl₂ ou H₃PO₄) podem ser aplicadas previamente para ampliar a área superficial e a funcionalidade superficial do biocarvão.¹³

Tabela 1. Produção e caracterização do biocarvão.

Etapa	Condições	Objetivo
Coleta do BSG	Após brassagem	Matéria-prima para biocarvão
Secagem	105 °C por 24h	Reduz umidade
Moagem	<2 mm	Homogeneizar granulometria
Pirólise convencional	300–700 °C, 30–120 min, atmosfera de N ₂	Produção de biocarvão com porosidade e estabilidade química definidas
Carbonização hidrotermal	180–250 °C, 4–8 h, biomassa úmida	Produção de hidrochar com propriedades distintas
Ativação física/química	CO ₂ 800 °C ou KOH/ZnCl ₂ /H ₃ PO ₄	Amplia área superficial e funcionalidade

Por fim, para garantir a adequação do material às diferentes aplicações, o biocarvão será caracterizado por: (i) Área superficial e porosidade (BET); (ii) Morfologia (MEV); (iii) Composição e cristalinidade (DRX e CHN); (iv) Grupos funcionais (FTIR e pHpzC); e (v) Teor de cinzas.⁸

Aplicações propostas e ensaios de validação

As seguintes aplicações foram selecionadas com base na viabilidade técnica e relevância para a cadeia produtiva da cerveja. Na filtração, o biocarvão será avaliado como coadjuvante na clarificação do mosto ou da cerveja, substituindo parcial ou totalmente materiais convencionais como terra diatomácea¹⁴. Ensaios comparativos utilizarão colunas ou sistemas em batelada, com análise de turbidez (nefelometria), tempo de filtração e coloração final (escala EBC). Na adsorção de compostos indesejáveis (off-flavors), o biocarvão será testado quanto à remoção de compostos como 4-vinilguaiacol, acetaldeído e trans-2-nonenal. Soluções modelo serão preparadas e submetidas a diferentes doses de biocarvão em batelada. A quantificação será realizada por cromatografia gasosa com espectrometria de massas (GC-MS).

No tratamento de água, a eficácia do biocarvão na remoção de contaminantes da água cervejeira⁸ será avaliada em sistemas de colunas contínuas ou em batelada. Os parâmetros analisados incluirão DQO, turbidez, cor aparente e metais pesados (por EAA). Modelos com adição artificial de Pb²⁺, Cd²⁺, fenol ou pesticidas serão utilizados como base de comparação. Na imobilização de biomoléculas, biocarvões previamente funcionalizados com grupos carboxílicos ou aminas serão testados como suporte para imobilização de enzimas (ex.: amilase) ou leveduras.¹⁵ Os ensaios serão conduzidos em sistemas descontínuos, com avaliação de consumo de glicose, produção de etanol e estabilidade da biomassa ao longo de diferentes ciclos fermentativos.

Tabela 2. Aplicações do Biocarvão na Produção de Cerveja.

Etapa	Aplicação	Parâmetros
Filtração	Clarificação do mosto/cerveja	Turbidez (nefelometria), tempo de filtração, coloração (EBC)
Adsorção de off-flavors	Remoção de compostos indesejáveis (4-vinilguaiacol, trans-2-nonenal, acetaldeído)	Quantificação por GC-MS
Tratamento de água	Remoção de contaminantes da água cervejeira	DQO, turbidez, cor aparente, metais pesados (EAA)
Imobilização de biomoléculas	Suporte para enzimas (ex.: amilase) ou leveduras	Consumo de glicose, produção de etanol, estabilidade da biomassa

Resultados e discussão

A proposta de valorização do bagaço de malte (BSG) por meio de sua conversão em biocarvão e reinserção em etapas do processo cervejeiro representa uma estratégia promissora sob a ótica da economia circular, contribuindo para a sustentabilidade ambiental, a redução de custos operacionais e o reaproveitamento de resíduos de elevado volume.

Dentre as aplicações propostas, destaca-se a possibilidade de uso do biocarvão como auxiliar de filtração, substituindo materiais tradicionais como terra diatomácea, cuja

extração envolve impactos ambientais significativos e altos custos logísticos.¹⁶ A literatura indica que materiais carbonáceos porosos derivados de resíduos agroindustriais têm se mostrado eficazes na remoção de turbidez, coloração e partículas coloidais de soluções aquosas e bebidas fermentadas.¹⁷

No controle de off-flavors, o biocarvão pode atuar como adsorvente seletivo⁸ para compostos como aldeídos e fenóis voláteis, frequentemente associados à oxidação ou contaminação microbiológica durante a fermentação ou o armazenamento. Isso pode aumentar a estabilidade sensorial e ampliar a vida útil da cerveja, sem necessidade de aditivos químicos.

No que diz respeito à etapa de tratamento da água, a aplicação de biocarvão como adsorvente⁸ contribui para a remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos presentes na água de processo, atendendo aos padrões de qualidade exigidos para a produção cervejeira. Estudos demonstram sua eficácia na redução de parâmetros como DQO, turbidez e metais pesados.¹⁸

Por fim, a imobilização de biomoléculas, como enzimas e leveduras, em suportes à base de biocarvão tem se mostrado uma abordagem viável para a melhoria da eficiência fermentativa, com vantagens em termos de reutilização do biocatalisador e estabilidade operacional. A literatura recente reforça o papel de materiais carbonáceos funcionalizados na retenção e estabilização de enzimas e microrganismos ativos em processos biotecnológicos.¹⁵

Embora teórica, esta proposta oferece um panorama para a integração do biocarvão derivado do BSG na indústria cervejeira. Para sua implementação prática, recomenda-se a realização de estudos-piloto em parceria com cervejarias artesanais e institutos de pesquisa, a fim de validar os benefícios técnicos, sensoriais e econômicos. Ensaios complementares poderão incluir análises de segurança alimentar, estabilidade de compostos voláteis e avaliação da viabilidade econômica frente aos materiais comerciais.

Conclusões

Este trabalho propôs uma abordagem teórica inovadora para a valorização do BSG por meio de sua conversão em biocarvão e aplicação em etapas estratégicas do processo produtivo da cerveja. As aplicações consideradas — filtração, adsorção de compostos indesejáveis, tratamento de

água e imobilização de biomoléculas — demonstram viabilidade técnica com base em evidências da literatura, reforçando o potencial do biocarvão como alternativa funcional e sustentável.

A proposta se alinha aos princípios da economia circular, ao promover o reaproveitamento de um resíduo volumoso e frequentemente descartado de forma inadequada, transformando-o em insumo útil para o próprio processo produtivo. As aplicações sugeridas podem contribuir para a melhoria da qualidade sensorial e físico-química da cerveja, além de promover práticas mais limpas e reduzir a dependência de insumos de origem mineral ou sintética.

Ainda que em estágio conceitual, os caminhos metodológicos delineados fornecem uma base sólida para a condução de estudos experimentais futuros. Como próximos passos, recomenda-se o desenvolvimento de testes laboratoriais e piloto, em colaboração com cervejarias e centros de pesquisa, de modo a validar os efeitos do biocarvão na prática e mensurar seus benefícios técnicos, sensoriais, ambientais e econômicos.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradecimentos ao LMCERVA e a Universidade de Brasília pelo apoio ao projeto.

Referências

- 1 A. Goyal, G. Shukla, S. Mishra, S. Mallik, A. Singh and M. Dubey, BEER PRODUCTION BY FERMENTATION PROCESS: A REVIEW, *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*, 2023, **13**.
- 2 V. Shopska, R. Denkova-Kostova and G. Kostov, Modeling in Brewing—A Review, *Processes*, 2022, **10**, 267.
- 3 Z. C. Hai, in 2011 International Conference on New Technology of Agricultural, IEEE, 2011.
- 4 L. Punčochářová, J. Pořízka, P. Diviš and V. Štursa, Study of the influence of brewing water on selected analytes in beer, *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2019, **13**, 507–514.
- 5 E. J. Pires, J. A. Teixeira, T. Brányik and A. A. Vicente, Yeast: the soul of beer's aroma—a review of flavour-active esters and higher alcohols produced by the brewing yeast, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, **98**, 1937–1949.
- 6 H. Sun, Y. Zhang, J. Hao, D. Wang, T. Li, M. Wang and Q. Guo, A Rapid Method for Testing Filtration Performance of Malt and the Optimization of the Method, *Fermentation*, 2023, **9**, 613.
- 7 A. Chetrariu and A. Dabija, Spent Grain: A Functional Ingredient for Food Applications, *foods*, 2023, **12**, 1533.
- 8 D. C. B. D. Santos, R. B. W. Evaristo, R. C. Dutra, P. A. Z. Suarez, E. A. Silveira and G. F. Ghesti, Advancing Biochar Applications: A Review of Production Processes, Analytical Methods, Decision Criteria, and Pathways for Scalability and Certification, *Sustainability*, 2025, **17**, 2685.
- 9 R. Cancelliere, K. Carbone, M. Pagano, I. Cacciotti and L. Micheli, Biochar from Brewers' Spent Grain: A Green and Low-Cost Smart Material to Modify Screen-Printed Electrodes, *Biosensors*, 2019, **9**, 139.
- 10 M. J. Bardi, J. M. Mutunga, H. Ndiritu and K. Koch, Effect of pyrolysis temperature on the physiochemical properties of biochar and its potential use in anaerobic digestion: A critical review, *Environmental Technology & Innovation*, 2023, **32**, 103349.
- 11 M. Jackowski, D. Semba, A. Trusek, M. Wnukowski, L. Niedzwiecki, M. Baranowski, K. Krochmalny and H. Pawlak-Kruczek, Hydrothermal Carbonization of Brewery's Spent Grains for the Production of Solid Biofuels, *Beverages*, 2019, **5**, 12.
- 12 A. Lorente, J. Remón, M. Salgado, A. J. Huertas-Alonso, P. Sánchez-Verdú, A. Moreno and J. H. Clark, Sustainable Production of Solid Biofuels and Biomaterials by Microwave-Assisted, Hydrothermal Carbonization (MA-HTC) of Brewers' Spent Grain (BSG), *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, **8**, 18982–18991.
- 13 R. Geremias, C. Pelissari, N. Libardi, D. Carpiné and R. H. Ribani, Chromium adsorption studies using

brewer's spent grain biochar: kinetics, isotherm and thermodynamics, *Ciênc. Rural*, 2023, **53**.

- 14 O. Cadar, I. Vagner, I. Miu, D. Scurtu and M. Senila, Preparation, Characterization, and Performance of Natural Zeolites as Alternative Materials for Beer Filtration, *Materials*, 2023, **16**, 1914.
- 15 A. Antanasković, Z. Lopičić, S. Dimitrijević-Branković, N. Ilić, V. Adamović, T. Šoštaric and M. Milivojević, Biochar as an Enzyme Immobilization Support and Its Application for Dye Degradation, *Processes*, 2024, **12**, 2418.
- 16 K. Wolny-Koładka, M. Zdaniewicz, S. Bodziacki, P. Terebun, M. Kwiatkowski, D. Zarzeczny and J. Pawłat, Effect of Non-Equilibrium Plasma on Microorganisms Colonizing Diatomaceous Earth after the Beer Filtration Process, *Applied Sciences*, 2023, **13**, 4081.
- 17 F. García-Ávila, A. Galarza-Guamán, M. Barros-Bermeo, E. A. Alfaro-Paredes, A. Avilés-Añazco and S. Iglesias-Abad, Integration of high-rate filtration using waste-derived biochar as a potential sustainable technology for drinking water supply, *Biochar*, 2023, **5**, 62.
- 18 S. Wang, H. Zhang, J. Wang, H. Hou, C. Du, P.-C. Ma and A. Kadier, in *Biochar and its Application in Bioremediation*, eds. R. Thapar Kapoor, H. Treichel and M. P. Shah, Springer Nature Singapore, Singapore, 2021, 67–90.

✉ protocolosemquimica@gmail.com

ଓ @protocolosemquimica

🔗 <https://protocolosemquimica.com/>

O grupo PET-Química/IQ/UnB agradece à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) por todo o apoio concedido através do Programa de Educação Tutorial.

