

Potencial energético da biomassa lignocelulósica e otimização da produção de etanol de segunda geração

DOI: 10.5281/zenodo.22312128

Maria Eduarda de Melo Garcia^{a*}

Agricultural waste, such as sugarcane bagasse, has great potential for energy recovery and for the production of second-generation bioethanol. These residues consist mainly of cellulose, hemicellulose, and lignin—components that give the biomass its strength and hinder the release of sugars. Therefore, before ethanol production can begin, preparation and pretreatment steps are necessary to modify the biomass's structure and facilitate access to its fermentable components. Among the techniques discussed, the use of microwaves and ultrasound stands out, as they can help increase the accessibility of cellulose and improve process efficiency. After pretreatment, enzymatic hydrolysis takes place, breaking down the cellulose and releasing sugars, followed by fermentation, in which microorganisms convert these sugars into ethanol. Finally, the ethanol is separated and concentrated through distillation. Thus, the utilization of this waste enables the production of a renewable biofuel, in addition to contributing to waste reduction and a more sustainable use of agricultural biomass.

Resíduos agrícolas, como o bagaço de cana-de-açúcar, apresentam grande potencial para o aproveitamento energético e para a produção de bioetanol de segunda geração. Esses resíduos são formados principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, componentes que conferem resistência à biomassa e dificultam a liberação dos açúcares. Por isso, antes da produção de etanol, é necessário realizar etapas de preparação e pré-tratamento, que modificam a estrutura da biomassa e facilitam o acesso às suas partes fermentescíveis. Entre as técnicas abordadas, destacam-se o uso de micro-ondas e ultrassom, que podem contribuir para aumentar a acessibilidade da celulose e melhorar a eficiência do processo. Após o pré-tratamento, ocorre a hidrólise enzimática, responsável pela quebra da celulose e liberação de açúcares, seguida da fermentação, na qual microrganismos transformam esses açúcares em etanol. Por fim, o etanol é separado e concentrado por meio da destilação. Dessa forma, o aproveitamento desses resíduos possibilita a produção de um biocombustível renovável, além de contribuir para a redução do desperdício e para um uso mais sustentável da biomassa agrícola.

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

**E-mail: dudamelog2007@gmail.com*

Palavras-chave: Bioetanol; Pré-tratamento físico-químico; Energia; Bagaço de cana-de-açúcar.

Recebido em 16 de agosto de 2026,
Aprovado em 30 agosto de 2026,
Publicado em 04 de setembro de 2026.

Introdução

Nos últimos anos, a busca por fontes de energia mais sustentáveis e renováveis tem ganhado destaque diante da necessidade de reduzir os impactos ambientais associados às fontes de energia convencionais. Nesse contexto, a biomassa apresenta-se como uma alternativa promissora, por utilizar matéria orgânica que pode ser convertida em energia e outros produtos de interesse. Contudo, para garantir um rendimento eficiente e uma produção satisfatória a partir desses resíduos, é necessário estudar e aplicar pré-tratamentos que favoreçam a fermentação, otimizando, assim, a produção de etanol.

Resíduos agroindustriais, como bagaço de malte, casca de banana e palha de milho, são exemplos de biomassas lignocelulósicas que podem ser aproveitadas para a produção de etanol de segunda geração (E2G). Além de possibilitar a geração de biocombustíveis a partir de fontes renováveis, o aproveitamento desses resíduos contribui para a redução do

seu descarte no meio ambiente e para o uso mais eficiente dos recursos disponíveis.

Para que a produção de etanol de segunda geração seja viável, a biomassa lignocelulósica deve ser submetida a uma etapa de pré-tratamento, responsável por desestruturar sua complexa matriz e romper a barreira formada principalmente por lignina, celulose e hemicelulose. Essa etapa aumenta a acessibilidade dos componentes estruturais da biomassa e favorece a posterior liberação dos açúcares fermentescíveis. Para isso, diferentes métodos de pré-tratamento podem ser empregados, incluindo processos físicos, químicos e físico-químicos, seguidos de etapas como hidrólise e fermentação, que possibilitam a conversão dos carboidratos em etanol.

A pesquisa sobre o aproveitamento energético da biomassa lignocelulósica mostra-se relevante por aliar a produção de fontes renováveis de energia à valorização de

resíduos agroindustriais, contribuindo para a redução dos impactos ambientais associados ao seu descarte.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de diferentes biomassas lignocelulósicas para a produção de etanol de segunda geração, com ênfase na aplicação e otimização de etapas de pré-tratamento capazes de aumentar a disponibilidade dos açúcares fermentescíveis. Dessa forma, busca-se identificar condições que favoreçam o aproveitamento da biomassa e aumentem a eficiência da produção de etanol, contribuindo para o desenvolvimento de alternativas energéticas mais sustentáveis.

Metodologia

Este trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica, baseada na análise de artigos científicos, livros e documentos técnicos relacionados à área de bioenergia e biocombustíveis. A pesquisa foi realizada por meio de plataformas digitais, como bases de dados acadêmicas e científicas, incluindo Google Acadêmico, CAPES e periódicos especializados, utilizando palavras-chave como “Biomassa”, “Bioetanol” e “Bagaço de cana-de açúcar”, “Pré-tratamento Físico-Químico” bem como suas combinações.

Como critérios de inclusão, foram considerados estudos publicados no período de 2012 a 2024, redigidos em português e inglês, que abordassem a produção de energia através da biomassa e os pré-tratamentos dos resíduos para sua fermentação.

Resultados e discussão

A utilização de resíduos agrícolas como matéria-prima para a produção de biocombustíveis tem ganhado destaque como uma alternativa para o aproveitamento de materiais que, muitas vezes, são descartados ou subutilizados. Esses materiais, denominados biomassa residual, podem apresentar elevado potencial energético e servir como matéria-prima para a produção de combustíveis, como o bioetanol de segunda geração (2G). Diferentemente do etanol convencional, produzido principalmente a partir de matérias-primas ricas em açúcares ou amido, o etanol 2G é obtido a partir de materiais lignocelulósicos, como bagaço e palha de cana-de-açúcar, palha de milho e resíduos florestais.

Antes de compreender o potencial energético da biomassa, é fundamental destacar a importância do aproveitamento e da otimização desses resíduos, uma vez que grande parte deles ainda é descartada ou subutilizada. Nesse sentido, a utilização da biomassa residual como matéria-prima para a produção de bioetanol 2G possibilita agregar valor a materiais que seriam desperdiçados, além de contribuir para a redução de impactos ambientais associados ao seu descarte. Assim, o aproveitamento eficiente desses resíduos representa uma alternativa promissora para ampliar a produção de biocombustíveis e explorar de forma mais sustentável fontes renováveis de energia.

Para compreender o potencial dessas biomassas, é necessário inicialmente conhecer sua composição química e seu conteúdo energético. A biomassa lignocelulósica é constituída principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, além de pequenas quantidades de extrativos, cinzas e outros componentes. A celulose é um polímero formado por unidades de glicose, enquanto a hemicelulose é constituída por diferentes açúcares, como xilose, arabinose, manose e glicose. Já a lignina é um polímero aromático de estrutura complexa que confere resistência e proteção à parede celular vegetal.

Outra propriedade importante para avaliar uma biomassa é o poder calorífico, que corresponde à quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão de uma determinada quantidade de material. Essa propriedade permite avaliar o potencial da biomassa para aplicações energéticas, como a geração de calor e eletricidade. Entretanto, quando o objetivo é produzir bioetanol, não basta analisar apenas o poder calorífico: é fundamental conhecer a quantidade e a disponibilidade dos carboidratos presentes na biomassa, uma vez que são eles que podem ser convertidos em açúcares fermentescíveis e, posteriormente, em etanol.

Figura 1. Composição química de diferentes biomassas lignocelulósicas. Extraído da Referência 2.

Resíduo	Composição Química (%)							Referência
	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Extrativos	Cinzas	Pectina	Proteína	
Palha de Milho	36,7	34,2	14,0	11,6	2,3	—	—	Santos, 2014
Sabugo de Milho	35,4	26,9	18,0	18,3	2,4	—	—	Santos, 2014
Casca de Arroz	34,0	13,0	29,0	3,0	17,0	—	2,0	Hickert, 2010
Casca de Soja	35,8	23,1	9,1	5,0	4,0	4,2	15,4	Rojas, 2012
Palha de Trigo	35,1	19,8	18,9	14,2	9,3	—	—	Kaparaku & Felby, 2010; Horst, 2013
Casca de Coco	41,0	21,5	30,6	3,7	6,5	—	—	Esteves, 2014
Palha de Cana-de-açúcar	44,3	31,1	19,0	16,7	4,9	—	—	Wolf, 2011

Apesar de apresentar grande potencial, a biomassa lignocelulósica possui uma estrutura naturalmente resistente à degradação. A celulose encontra-se organizada em regiões parcialmente cristalinas e está associada à hemicelulose e à lignina, formando uma estrutura complexa que dificulta o acesso das enzimas às cadeias de celulose. Dessa forma, não é possível simplesmente adicionar a biomassa a um meio de fermentação e esperar que todo o seu conteúdo de carboidratos seja convertido em etanol. É necessário realizar uma etapa de preparação e pré-tratamento para tornar os componentes estruturais mais acessíveis.

De maneira geral, a produção de bioetanol 2G pode ser dividida em etapas principais: preparação da biomassa, pré-tratamento, hidrólise, fermentação e separação do etanol, geralmente por destilação. Cada uma dessas etapas possui uma função específica e contribui para aumentar a eficiência do processo.

Antes do pré-tratamento propriamente dito, a biomassa pode passar por etapas de preparação. No caso do bagaço de cana-de-açúcar, por exemplo, a lavagem pode ser utilizada para remover açúcares solúveis e outros materiais superficiais que já estavam presentes no resíduo. Essa etapa é importante para que os açúcares posteriormente encontrados possam ser relacionados ao tratamento realizado. Em seguida, a secagem permite reduzir a umidade e trabalhar com uma quantidade conhecida de matéria seca. A moagem reduz o tamanho das partículas, aumentando a área superficial disponível para as etapas seguintes. Por fim, a padronização busca garantir que as amostras apresentem características físicas semelhantes, permitindo uma comparação mais adequada entre os tratamentos.

Após essa preparação, realiza-se o pré-tratamento, cujo objetivo não é necessariamente transformar diretamente a celulose em glicose, mas sim alterar a estrutura da biomassa e aumentar a acessibilidade dos carboidratos às enzimas, uma vez que sua matriz é complexa. Dependendo da metodologia empregada, o pré-tratamento pode promover a ruptura ou alteração da estrutura da lignina, a remoção parcial da hemicelulose, a redução da cristalinidade da celulose e o aumento da área superficial do material. Dessa maneira, a celulose torna-se mais exposta e disponível para a etapa de hidrólise acarretando na melhor otimização destes materiais.

Entre as diferentes tecnologias de pré-tratamento existentes, destacam-se métodos físicos, químicos e físico-químicos. Neste estudo, podem ser considerados, por exemplo, os tratamentos utilizando ultrassom e micro-ondas, que apresentam potencial para modificar a estrutura da biomassa e favorecer a posterior liberação de açúcares.

O ultrassom atua na matriz lignocelulósica por meio de ondas sonoras de alta frequência, que provocam o fenômeno de cavitação acústica no meio líquido. A formação e o colapso dessas microbolhas geram forças mecânicas capazes de romper e desorganizar a estrutura da biomassa, favorecendo a remoção ou desestruturação parcial da lignina e a solubilização da hemicelulose. Como consequência, ocorre o rompimento das interações entre lignina, hemicelulose e celulose, aumentando a porosidade e a área superficial do material. Essa desestruturação torna a celulose mais exposta e acessível, facilitando a ação das enzimas durante a etapa de hidrólise e, conseqüentemente, favorecendo a liberação de açúcares fermentescíveis para a produção de bioetanol de segunda geração.

Já o tratamento por micro-ondas utiliza radiação eletromagnética que interage principalmente com moléculas polares e espécies iônicas presentes na biomassa e no meio de tratamento. Essa interação provoca o aquecimento rápido do material, promovendo alterações na estrutura da matriz lignocelulósica. O aumento da temperatura pode favorecer a ruptura das interações entre lignina, hemicelulose e celulose, contribuindo para a desestruturação da lignina e a solubilização da hemicelulose. Como consequência, a celulose fica mais exposta e acessível, facilitando sua posterior hidrólise e a liberação de açúcares fermentescíveis. Além disso, o aquecimento rápido proporcionado pelas micro-ondas pode reduzir o tempo de pré-tratamento e aumentar a eficiência do processo. Entretanto, é necessário controlar parâmetros como temperatura, tempo de exposição e concentração do meio, pois condições muito severas podem favorecer a degradação dos açúcares e a formação de compostos inibidores, como furfural e HMF.

De acordo com os dados experimentais do artigo referência 1 sobre o pré-tratamento físico-químico do bagaço da cana-de-açúcar, observou-se que no tratamento por micro-ondas, as amostras foram expostas por 10, 20 e 30 minutos, utilizando água destilada ou soluções de ácido sulfúrico nas concentrações de 0,1 M e 1 M. Os melhores resultados foram obtidos com água e H₂SO₄ 0,1 M. Com água, as concentrações de açúcares redutores variaram de 31,2 a

58,0 g de glicose L⁻¹, enquanto os açúcares redutores totais ficaram entre 70,6 e 77,5 g de glicose L⁻¹. Após a fermentação, os destilados apresentaram teores alcoólicos entre 5,5 e 7,5 °GL.

A associação entre micro-ondas e H₂SO₄ 0,1 M também foi eficiente, produzindo entre 50,6 e 54,3 g de glicose L⁻¹ de açúcares redutores e entre 74,8 e 78,8 g de glicose L⁻¹ de açúcares redutores totais. O maior teor alcoólico registrado na tabela foi de 8,6 °GL, obtido após 20 minutos de tratamento. Em contraste, a solução de H₂SO₄ 1 M não apresentou concentrações detectáveis de açúcares e resultou em teor alcoólico inferior a 0,5 °GL, indicando que o aumento da acidez não favoreceu o processo nas condições avaliadas.

Esses resultados demonstram uma relação positiva entre a quantidade de açúcares liberados durante o pré-tratamento e o teor alcoólico obtido após a fermentação. O uso de água com micro-ondas merece destaque por dispensar ácido sulfúrico e, ainda assim, proporcionar concentrações elevadas de açúcares e produção satisfatória de etanol. Isso representa uma possível vantagem ambiental, operacional e econômica, devido à redução do consumo de reagentes químicos e das etapas posteriores de neutralização e tratamento de resíduos.

Já o pré-tratamento por ultrassom apresentou baixa eficiência em todas as condições avaliadas. Os açúcares redutores permaneceram entre 2,0 e 4,9 g de glicose L⁻¹, enquanto os açúcares redutores totais variaram de 3,5 a 4,9 g de glicose L⁻¹. Mesmo com o uso de ácido sulfúrico, não ocorreu aumento relevante na liberação de carboidratos. Como essas concentrações foram insuficientes para viabilizar a fermentação alcoólica, não foi possível produzir etanol nem determinar o teor alcoólico dessas amostras.

A baixa eficiência do ultrassom não significa, necessariamente, que a técnica seja inadequada para a biomassa lignocelulósica. O resultado indica que as condições empregadas — banho ultrassônico de 50 W, temperatura de 27 °C e tempos entre 10 e 30 minutos — provavelmente não forneceram energia suficiente para promover uma desestruturação expressiva do material. A eficiência dessa técnica depende de fatores como potência, intensidade da cavitação, tempo de exposição, temperatura, concentração do solvente, granulometria e proporção entre biomassa e líquido. Portanto, seria necessário otimizar esses parâmetros ou combinar o ultrassom com outros métodos de pré-tratamento.

Em nenhum dos tratamentos foi detectado hidroximetilfurfural (HMF). Esse resultado é positivo, pois o HMF é um produto da degradação dos açúcares e pode atuar como inibidor da fermentação. Assim, embora o ultrassom não tenha promovido liberação suficiente de açúcares, ambos os métodos apresentaram baixa formação de compostos indesejáveis nas condições estudadas.

De forma geral, os resultados indicam que o micro-ondas, principalmente quando associado à água ou ao H₂SO₄ 0,1 M, foi o método mais promissor para o pré-tratamento do bagaço de cana e para a produção posterior de etanol de segunda geração. O ultrassom, por sua vez, necessita de maior otimização antes de ser considerado tecnicamente viável.

Assim, após o pré-tratamento, ocorre a hidrólise enzimática. Nessa etapa, enzimas, principalmente celulasas, atuam sobre as cadeias de celulose, promovendo sua quebra e liberando açúcares menores, principalmente glicose. A hemicelulose também pode ser hidrolisada, liberando outros açúcares, como xilose e arabinose. Portanto, é importante diferenciar as etapas: o pré-tratamento prepara e modifica a estrutura da biomassa, enquanto a hidrólise é responsável pela conversão dos polímeros de carboidratos em açúcares menores e fermentescíveis.

Os açúcares liberados na hidrólise são então utilizados na etapa de fermentação alcoólica. Nesse processo, microrganismos, como leveduras do gênero *Saccharomyces*, metabolizam principalmente a glicose e produzem etanol e dióxido de carbono. Uma das reações simplificadas que representa esse processo é:



Entretanto, em uma biomassa lignocelulósica, a presença de diferentes tipos de açúcares torna o processo mais complexo, pois nem todos os microrganismos utilizados na fermentação convencional conseguem aproveitar eficientemente os açúcares provenientes da hemicelulose, como a xilose. Por isso, a escolha do microrganismo e das condições de fermentação também é um fator importante para aumentar o rendimento do processo.

Por fim, após a fermentação, o meio apresenta etanol diluído juntamente com água e outros componentes. Assim, é

necessária uma etapa de separação e purificação, sendo a destilação uma das técnicas mais utilizadas. Dessa forma, o processo completo pode ser compreendido como uma sequência em que cada etapa possui uma finalidade específica: a preparação torna a biomassa adequada ao processamento; o pré-tratamento rompe ou modifica sua estrutura resistente; a hidrólise libera os açúcares; a fermentação converte esses açúcares em etanol; e, finalmente, a destilação permite sua recuperação e concentração.

Portanto, o aproveitamento de resíduos agrícolas para a produção de bioetanol de segunda geração representa uma alternativa interessante para agregar valor a materiais que seriam descartados, reduzir a dependência de matérias-primas convencionais e contribuir para o aproveitamento mais eficiente dos recursos disponíveis. A eficiência do processo, entretanto, depende diretamente das características da biomassa e das condições utilizadas em cada etapa, especialmente do pré-tratamento, que deve aumentar a disponibilidade dos carboidratos sem provocar perdas excessivas de açúcares ou a formação de compostos que possam inibir a hidrólise e a fermentação.

Conclusões

A produção de bioetanol de segunda geração a partir de resíduos agrícolas apresenta-se como uma alternativa promissora para o aproveitamento de biomassas que, muitas vezes, são descartadas ou subutilizadas. A presença de celulose e hemicelulose nesses materiais demonstra seu potencial como fonte de açúcares fermentescíveis, enquanto o conhecimento de propriedades como o poder calorífico permite avaliar seu potencial energético.

Entretanto, a estrutura resistente da biomassa lignocelulósica representa um dos principais desafios para a obtenção do etanol. Nesse sentido, o pré-tratamento é uma etapa fundamental, pois modifica a estrutura do material e aumenta a acessibilidade da celulose e da hemicelulose às enzimas. Técnicas como o ultrassom e o micro-ondas apresentam potencial para melhorar essa etapa, podendo reduzir o tempo de processamento e favorecer a liberação de açúcares.

Assim, comparando os dois tratamentos abordados diante das condições expostas no experimento, os resultados demonstraram que o pré-tratamento por micro-ondas, especialmente associado à água ou ao H_2SO_4 0,1 M, foi mais

eficiente na liberação de açúcares fermentescíveis e, consequentemente, na produção de etanol de segunda geração, alcançando teor alcoólico de até 8,6 °GL. Em contrapartida, o ultrassom apresentou baixa liberação de açúcares nas condições avaliadas, inviabilizando a fermentação alcoólica. A ausência de HMF em ambos os tratamentos indica baixa formação de compostos inibidores, embora o uso do ultrassom ainda necessite de otimização de seus parâmetros operacionais.

Posteriormente, a hidrólise enzimática possibilita a conversão dos carboidratos estruturais em açúcares fermentescíveis, que podem ser utilizados por microrganismos para a produção de etanol. Assim, a eficiência de todo o processo depende da integração adequada entre as etapas de preparação, pré-tratamento, hidrólise, fermentação e separação.

Dessa forma, o aproveitamento de resíduos agrícolas para a produção de bioetanol 2G contribui não apenas para a geração de uma fonte renovável de energia, mas também para a redução do desperdício e para o desenvolvimento de processos mais sustentáveis. O estudo e o aprimoramento das condições de pré-tratamento são, portanto, essenciais para aumentar o aproveitamento da biomassa e tornar a produção de bioetanol de segunda geração cada vez mais eficiente e viável.

Contribuições por Autor

A elaboração da resenha dos artigos de referência e a inclusão das observações são de autoria de Maria Eduarda de Melo Garcia.

Conflito de interesse

Não há conflitos de interesse.

Agradecimentos

Ao Grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela bolsa concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 T. Liana, M. R. Soares, L. Q. C. Silva, M. A. F. Souza, H. F. P. Costa, S. M and A. R. A. Arana,

Maximizando o etanol de segunda geração a partir de biomassa, *Revista Em Agronegócio E Meio Ambiente*, 2024, 17, e 12577.

- 2 M. S. R. S Rocha, R. M. R. G Almeida and A. J. G. Cruz, Avaliação do potencial energético de resíduos agroindustriais provenientes de diferentes regiões brasileiras, *Engevista*, 2017, 19 e 217-235.
- 3 M. M. S. Cabral, N. K. S. Abud, M. R. S. R. Rocha, R. M. R. G. Almeida and M. A. Gomes, Composição da fibra da casca de coco verde in natura e após pré-tratamentos químicos, *Engevista*, 2017, 19 e 99-108.
- 4 K. Bes, J. S. Lemões, C. F. L. Silva and S. D. A. Silva, Extração e caracterização da lignina proveniente do pré-tratamento de biomassa para produção de etanol de 2º geração, *SciELO*, 2019, 24 e 55-56.
- 5 F. A. Santos, J. H. Queiroz, J. L. Colodette, M. Manfredi, M. E. L. R. Queiroz, C. S. Caldas and F. E. F. Soares, *SciELO*, Otimização do pré-tratamento hidrotérmico da palha de cana-de-açúcar visando à produção de etanol celulósico, 2013, 37, 56-62.