

Geração de energia a partir de resíduos agroindustriais no Brasil: etanol de segunda geração

DOI: 10.5281/zenodo.10000968

Pedro Paulo Marques*^a

With the aim of transforming ethanol into an alternative to meet the current global demand for fuels, techniques for converting lignocellulosic biomass into fermentable sugars have come into focus, enabling efficient production of this compound. The referenced article assessed the potential of Brazilian agricultural residues as a biomass source for second-generation ethanol production. The study demonstrated that rice straw and sugarcane straw exhibit high conversion rates of cellulose into ethanol, around 80% and 85-89%, respectively, while other agricultural waste species show conversion rates around 60%. All the residues have the potential for bioethanol production on the order of billions of liters per year.

Com o intuito de transformar o etanol em uma alternativa para suprir a atual demanda global por combustíveis, as técnicas para transformar a biomassa lignocelulósica em açúcares fermentáveis entraram em foco, permitindo a produção desse composto de forma eficiente. O artigo de referência avaliou o potencial dos resíduos agrícolas brasileiros como fonte de biomassa para produzir etanol de segunda geração. O estudo demonstrou que a palha de arroz e a palha de cana-de-açúcar apresentam alta conversão de celulose em etanol, em torno de 80% e 85-89%, respectivamente, enquanto as outras espécies de resíduos agrícolas apresentam conversão em torno de 60%. Todos os resíduos têm o potencial para uma produção de bioetanol na ordem de bilhões de litros por ano.

Universidade de Brasília - UnB. Campus Darcy Ribeiro - Instituto de Química.

*E-mail: ppmarques01@gmail.com

Recebido em 31 de agosto de 2023,
Aceito em 30 de setembro de 2023,
Publicado em 31 de outubro de 2023.

Introdução

Atualmente, a maior parte da energia produzida no mundo ainda é proveniente de fontes de carbono fóssil, como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural. No entanto, a utilização desses combustíveis tem impactado negativamente a qualidade e equilíbrio ambiental, ameaçando principalmente o ecossistema terrestre. Por esse motivo, é importante que o seu uso seja condicionado a fim de se evitar altos níveis de poluição nos grandes centros urbanos.¹

Em contrapartida, de acordo com o estudo feito pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES),² os biocombustíveis apresentam duas vantagens significativas em comparação com os combustíveis de origem fóssil. Um dos benefícios citados, é que seu uso permite uma redução na emissão de carbono para a atmosfera, o que auxilia na mitigação da emissão de gases de efeito estufa, responsáveis por exacerbar o aquecimento global. A outra vantagem, é que os biocombustíveis são considerados ecologicamente favoráveis, dado que liberam 50% menos material particulado e 98% menos enxofre em comparação com os combustíveis fósseis.^[3] Além disso, o uso de biocombustíveis contribui para o aumento da quantidade de empregos no setor rural, a redução da dependência humana em fontes de energia fóssil e é uma opção mais econômica do ponto de vista da pesquisa, uma vez

que as pesquisas para a prospecção de petróleo são muito custosas.⁴

Existem três tipos de matérias-primas que podem ser utilizadas na produção de bioetanol: aquelas que já possuem açúcares prontamente disponíveis, como a cana-de-açúcar, o sorgo doce e a beterraba (conhecidas como sacarificadas); aquelas que possuem amido, como o milho, a batata, os cereais e a mandioca (conhecidas como amiláceas); e aquelas que possuem celulose, como a madeira e a palha (conhecidas como celulósicas).⁵

A produção comercial de bioetanol de primeira geração é feita através de dois processos tecnológicos: um que utiliza matérias-primas doces, que são diretamente fermentáveis, como a cana-de-açúcar e a beterraba açucareira, e outro que utiliza matérias-primas amiláceas, como o milho e o trigo, em que o amido precisa ser convertido em açúcares (processo chamado sacarificação) antes da fermentação.¹

Com o intuito de aumentar a produção de bioetanol, melhorar a eficiência do processo e reduzir os impactos ambientais, surgiu o estudo do processo de obtenção do bioetanol de segunda geração, que usa materiais lignocelulósicos como o excedente do bagaço, resíduos agrícolas e lixo, que ao passar por tratamentos químicos, termoquímicos ou rotas bioquímicas pode-se obter um produto

final com qualidade.^[6] Assim, é possível produzir uma maior quantidade de bioetanol, sem aumentar a quantidade de cana-de-açúcar plantada, visto que o bagaço que seria descartado também é utilizado para a produção de bioetanol. Além disso, a utilização desses resíduos agroindustriais pode diminuir o valor do produto final, uma vez que o tratamento, o transporte e a disposição final dos resíduos influencia diretamente o custo da operação.⁷ Sem existir essa preocupação com o descarte, a empresa gastaria menos com a produção de etanol.

Os principais componentes da biomassa lignocelulósica são a celulose, que corresponde a 36-61% da composição, a hemicelulose, que representa de 13 a 39%, e a lignina, que pode ser encontrada de 6% até 29%.⁸ O processo de produção de bioetanol de segunda geração a partir desses componentes pode ser dividido nas seguintes operações: pré-tratamento da biomassa, hidrólise e fermentação.

Em síntese, o artigo em questão avalia a capacidade dos resíduos agrícolas disponíveis no Brasil como uma possível fonte de biomassa para a produção de bioetanol de segunda geração, comparando suas características de produção e valorização como resíduo. Entretanto, é importante destacar que pela vocação natural que possui para a agroindústria, o Brasil apresenta como biomassa residual, predominante, o bagaço de cana-de-açúcar.

Metodologia

Os métodos e materiais para determinação da celulose, da hemicelulose e da lignina da palha de trigo, da palha de arroz, da palha de cana-de-açúcar, do bagaço de cana-de-açúcar e do pseudocaule da bananeira foram, respectivamente, os que se encontram nos artigos de Zhu, Santos, Santos, Rocha e Silva.

Resultados e Discussão

No artigo de referência, é discutido sobre cinco tipos de resíduos agroindustriais: a palha da cana-de-açúcar, o bagaço da cana-de-açúcar, a palha de trigo, a palha de arroz e o pseudocaule da bananeira, que são as principais biomassas utilizadas na produção de bioetanol no Brasil.

Desenvolvendo um pouco mais sobre a palha da cana-de-açúcar, ela representa 1/3 da energia potencial da cana-de-açúcar, que ainda é subaproveitada. A queima da palha é comum no Brasil, mas tem impactos ambientais significativos, incluindo emissões de gases do efeito estufa e poluição do ar.^[10] De acordo com o artigo escrito por Fortes, uma forma de tentar contornar esses impactos ambientais é adotar a prática de lançar a palha sobre o solo após a colheita, que pode reduzir

o uso de fertilizantes e beneficiar a sustentabilidade, mas estudos mostram que a decomposição da palha no campo emite quase o dobro de N₂O, um dos gases do efeito estufa, em comparação com a queimada.^[12] Portanto, aproveitar a palha da cana-de-açúcar para produzir etanol ganhou ainda mais evidência.

Já o bagaço de cana é o resíduo sólido que permanece após a extração do suco de cana-de-açúcar. No Brasil, a produção de açúcar e etanol gera quantidades significativas de bagaço. Durante a safra de 2010/2011, mais de 625 milhões de toneladas de cana-de-açúcar foram processadas, resultando em cerca de 208 milhões de toneladas de bagaço de cana.^[13] Para evitar o descarte do bagaço e minimizar os impactos ambientais, estudos estão sendo realizados para explorar sua celulose e outros componentes para a produção de etanol e outras aplicações na indústria de biorrefinaria.

No caso da palha de trigo, ela pode ser convertida em etanol ou pode ser usada como matéria-prima para a produção de papel e bioenergia, por meio da queima, em virtude de ser um dos principais materiais lignocelulósicos e dessa forma conter em abundância celulose, hemicelulose e lignina.^[14] Outrossim, a palha de trigo é geralmente utilizada como fertilizante orgânico ou como cama para instalação de animais, já que corresponde a cerca de 50% do peso da planta de trigo e é o principal resíduo da colheita de trigo no Brasil. Se 50% dos resíduos de palha estiverem disponíveis para conversão, mais de 600 milhões de litros de etanol e 1 milhão de toneladas de lignina poderiam ser produzidos, considerando a produção de cerca de 6 milhões de toneladas de palha de trigo da cultura brasileira de trigo.^[15]

Na sequência, a palha de arroz tem diversas aplicações, tais como: adsorvente para extração de ouro, remoção de metais pesados em águas residuais, remoção de ácidos graxos livres em óleo de soja, e remoção de metais em soluções sintéticas. Na agricultura, é utilizado como substrato para enraizamento, hidroponia em morangueiros, e como substituto do xaxim em vasos para plantas e flores. Além disso, a palha de arroz pode ser queimada de forma controlada, produzindo cinzas com alto teor de sílica e baixo teor de carbono, que são usadas como componente em concretos e argamassas à base de cimento Portland.^[16]

Por último, os plantadores de banana em Pernambuco estão descobrindo que o pseudocaule, a parte da bananeira que se estende desde o solo até o fruto, pode ser uma valiosa fonte de matéria-prima para a produção de caixas de papelão. Embora essa parte da planta tenha sido negligenciada por muito tempo, há anos se estuda a viabilidade técnica de produzir polpa

celulósica a partir dos resíduos da bananeira, principalmente do pseudocaule e do engaço. O pseudocaule pode ser utilizado para produzir massa de celulose, que pode ser usada na fabricação de papéis especiais e na produção de etanol, fermentação de pentoses e biogás.¹⁷ A tabela 1 apresenta a composição lignocelulósica das principais biomassas utilizadas na produção de bioetanol no Brasil.

Tabela 1. Composição química das biomassas utilizadas para produção de bioetanol.¹⁻⁵

Biomassa	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Palha de trigo¹	35	24	25
Palha de arroz²	38	27	8
Palha de cana-de-açúcar³	39	30	25
Bagaço de cana-de-açúcar⁴	43	26	22
Pseudocaule da bananeira⁵	46	10	15

Em seguida, após enunciado um pouco das características dos principais resíduos agroindustriais utilizados na produção de bioetanol no Brasil, será abordado o processo de produção do bioetanol que, como já foi dito, pode ser dividido no pré-tratamento, na hidrólise e na fermentação.

O pré-tratamento tem como objetivo principal melhorar a digestibilidade da celulose. A digestibilidade se refere à capacidade de quebrar ou decompõer a celulose em componentes mais simples, como açúcares. Assim ela permite que as enzimas da etapa de hidrólise tenham maior acesso ao material e realizem a hidrólise de forma mais eficiente. Cada tipo de pré-tratamento afeta de forma específica as frações de celulose, hemicelulose e lignina presentes na matéria-prima, e por isso, a escolha do método deve ser feita de acordo com as características da matéria prima escolhida, levando em consideração que tipo de hidrólise será usada.²⁰ A etapa de pré-tratamento é necessária devido à ação da lignina, que impede o inchaço das fibras e restringe a hidrólise. Por isso, é preciso quebrar a estrutura cristalina da lignocelulose e remover a lignina para expor as moléculas de celulose e hemicelulose à ação enzimática.²¹ Existem diferentes tipos de pré-tratamento, que podem ser térmicos, químicos, físicos, biológicos ou uma

combinação deles, dependendo do grau de separação requerido e do objetivo final do processo.¹

A hidrólise tem a função de converter os polissacarídeos da biomassa em açúcares fermentáveis. Para realizar esse processo, as tecnologias de hidrólise são complexas e multifásicas, em que pode-se utilizar rotas ácidas e/ou enzimáticas para separar os açúcares e remover a lignina. A hidrólise ácida é desenvolvida em dois estágios, sendo o primeiro estágio conduzido baseado nas condições do material após o pré-tratamento, com o foco na hidrólise da hemicelulose e o segundo estágio, no qual é efetuado em temperaturas elevadas, como foco na hidrólise da celulose¹. No entanto, esse tipo de hidrólise tem a desvantagem de gerar produtos deteriorantes que inibem a fermentação microbiana, como fragmentos de furfural e lignina e compostos como ácido acético, difenóis, derivados de fenilpropano e cetonas.²¹ Por outro lado, a hidrólise enzimática é catalisada pelas celulases e não gera subprodutos, mas precisa de complementação nutricional para ocorrer adequadamente.¹ Além disso, segundo Ogeda, é necessário remover a hemicelulose e a lignina para aumentar a eficiência da hidrólise enzimática da celulose. O processo é semelhante ao processo natural de quebra de moléculas de celulose em açúcares por enzimas secretadas por microrganismos, como fungos e bactérias, e sua subsequente fermentação em etanol por leveduras.¹

Por fim, na fermentação ocorre a conversão dos açúcares em etanol, dióxido de carbono e outros subprodutos, através da ação de leveduras, como o *Saccharomyces cerevisiae*, que é amplamente empregado na produção industrial de biocombustíveis, devido à sua habilidade de metabolizar a glicose da cana-de-açúcar ou da celulose de resíduos de biomassa de maneira eficiente.¹

A tabela 2 apresenta os potenciais de conversão de celulose e a capacidade anual de produção de bioetanol para cada resíduo, evidenciando que há uma vasta oportunidade de aproveitamento desses resíduos. Considerando que são gerados em grande quantidade e muitas vezes são simplesmente armazenados ou descartados, há um grande desperdício de uma valiosa fonte de energia.

Tabela 2. Relação entre o teor de celulose, seu potencial de conversão em etanol e capacidade produtiva alcóolica em função da produção anual de cada biomassa lignocelulósica no Brasil¹⁻¹⁰

Resíduo	Celulose (%)	Conversão de celulose em etanol (%)	Produção residual anual (t)	Produção bioetanol (L)
Palha cana ⁶	39	85 ¹	208 milhões	87,38 bilhões
Palha trigo ⁷	35	89 ²	6 milhões	2,37 bilhões
Palha de arroz ⁷	38	80 ³	3 milhões	1,15 bilhões
Bagaço cana ⁹	43	89 ⁴	208 milhões	100,88 bilhões
Pseudocaule bananeira ¹⁰	46	61 ⁵	50 milhões	17,78 bilhões

Em termos gerais, ao equilibrar a quantidade de celulose, a produção anual dos resíduos e o potencial de conversão de cada material em etanol, é possível estimar que a utilização dessas biomassas lignocelulósicas para a produção de bioetanol pode resultar em bilhões de litros desse biocombustível. É importante destacar que as técnicas ainda estão em fases de aprimoramento, entretanto a conversão de celulose, encontrada em vários estudos, já é alta, em média acima de 80%, o que estimula a procura por novas tecnologias que otimizem o acesso à celulose, aumentando a produção de álcool e reduzindo os custos.

Neste momento, há um crescente aumento nas inovações relacionadas à utilização de biomassa, como por exemplo: a criação de organismos geneticamente modificados capazes de produzir combustível a partir de qualquer tipo de material orgânico; a prospecção e seleção de fungos que visam obter enzimas mais eficientes para hidrolisar o material lignocelulósico, aproveitando a alta biodiversidade existente no Brasil como uma oportunidade de encontrar microrganismos com novidades nesse aspecto; processos termoquímicos, que funcionam como uma planta de biomassa em líquidos (BTL), convertendo a matéria-prima em gás e posteriormente em combustível; e testes com microrganismos fermentadores, como os fungos *Trichoderma reesei*, *Candida shehatae* e *Saccharomyces cerevisiae*, que visam identificar as similaridades e diferenças no metabolismo de carboidratos,

reduzindo o tempo da etapa de fermentação e controlando possíveis inibidores.

Por mera curiosidade, os conceitos e técnicas de produção de terceira e quarta geração ainda estão em desenvolvimento, mas já foram definidos quanto às suas áreas de atuação. A tecnologia de terceira geração concentra-se em aproveitar novas formas de colheita de energia, como por exemplo, modificando as características de árvores para diminuir o teor de lignina, aumentar o teor de açúcar ou torná-las mais resistentes a altas temperaturas. Por outro lado, a quarta geração transforma as fontes de biomassa em máquinas captadoras de carbono, removendo o CO₂ da atmosfera e armazenando-o em seus galhos, troncos e folhas. Posteriormente, essas fontes de biomassa ricas em carbono podem ser convertidas em combustível e gases.

Adicionalmente, através do investimento em tecnologias avançadas, a Raízen, uma empresa brasileira de combustíveis, destaca-se como a única empresa do mundo a produzir em escala comercial o biocombustível por meio do reaproveitamento de subprodutos do processo produtivo, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar. O biocombustível de segunda geração (E2G), como já descrito, é diferenciado pelo uso do bagaço resultante da produção de açúcar e etanol convencionais de primeira geração (E1G) para a produção adicional de etanol. Esse reaproveitamento possibilita um aumento de até 50% na produção sem a necessidade de expandir a área cultivada. Além disso, esse biocombustível avançado apresenta uma redução de 30% nas emissões de gases de efeito estufa em comparação ao etanol E1G. Vale ressaltar que o nosso E2G é certificado pelos rigorosos padrões de sustentabilidade estabelecidos pela Bonsucro e pela ISCC (*International Sustainability & Carbon Certification*).⁹

Em última análise, a tarefa importante para a implementação de biocombustíveis é vencer o custo reduzido da fabricação dos derivados de petróleo, estabelecendo alvos estratégicos nacionais de longo e médio prazo.

Conclusão

Os combustíveis de segunda geração representam uma mudança na bioconversão, eliminando o suposto dilema entre combustíveis e alimentos. Ao contrário da geração anterior, que se baseava principalmente em açúcares, amidos e óleos facilmente extraíveis, a segunda geração permite o uso de todas as formas de biomassa lignocelulósica e, portanto, a preocupação em relação à quantidade de cana-de-açúcar, por

exemplo, destinada à produção de açúcar versus a quantidade destinada à produção de etanol torna-se menos relevante.

Além disso, no Brasil, foram identificadas diversas fontes alternativas para a produção de etanol de segunda geração, incluindo palha de cana-de-açúcar, bagaço de cana, palha de trigo, palha de arroz e pseudocaule de bananeira. A palha e o bagaço de cana-de-açúcar, com teores de celulose em média de 39% e 43%, respectivamente, apresentam um potencial estimado de produção de etanol de aproximadamente 88 e 101 bilhões de litros. Os resíduos da cultura de arroz e trigo possuem um potencial de produção de 1,15 e 2,37 bilhões de litros, respectivamente, valores inferiores comparados à produção de etanol devido à diferença na produção anual desses resíduos e não devido à taxa de conversão da celulose. O pseudocaule da bananeira, que possui um teor mais elevado de celulose e aplicação de baixo valor agregado, apresenta um potencial de produção de aproximadamente 17 bilhões de litros de etanol.

Nesse contexto, os materiais lignocelulósicos desempenham um papel importante, devido à sua abundância e ao seu caráter renovável, despertando um grande interesse como fonte de energia que não contribui para o acúmulo de gases do efeito estufa na atmosfera.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Pedro Paulo Marques.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Esta resenha foi possibilitada pelo Ministério da Educação, pela Fundação Nacional para o Desenvolvimento da Educação, FNDE, pela Universidade de Brasília e pelo Instituto de Química.

Notas e referências

- 1 R. M. Nunes, E. A. Guarda, J. C. V. Serra e A. A. Martins, Resíduos agroindustriais: potencial de produção do etanol de segunda geração no Brasil, *Revista Liberato*, 2013, **14**, 135–149.
- 2 Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, Bioetanol de cana de açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável, BNDES, 2008.
- 3 M. F. Pompelli, A. J. J. Orozco, M. T. Oliveira, B. F. M. Rodrigues, M. O. Barbosa, M. G. Santos, A. F. M. Oliveira e J. S. Almeida-Cortez, Crise Energética Mundial e o papel do Brasil na problemática de biocombustíveis, *Agronomía Colombiana*, 2011, **29**, 231-240.
- 4 J. M. Silva e L. C. Konradt-Moraes, Vantagens e Desvantagens dos Biocombustíveis e dos Combustíveis Fósseis, *Anais do 10º Semex*, 2012.
- 5 M. Balat, H. Balat, C. Oz, Progress in bioethanol process, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, **34**, 551-573.
- 6 M. O. S. Dias, M. P. Cunha, R. M. Filho, A. Bonomi, C. D. F. Jesus e C. E. V. Rossell, Simulation of integrated first and second generation bioethanol production from sugarcane: comparison between different biomass pretreatment methods, *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 2010, **38**, 955-966.
- 7 M. F. Rosa, M. S. M. S. Filho, M. C. B. Figueirêdo, J. P. S. Moraes, S. Santaella e R. C. Leitão, Valorização dos Resíduos da Agroindústria, *II Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais*, 2011, **1**.
- 8 S. Brethauer e C. E. Wyman, Review: Continuous hydrolysis and fermentation for cellulosic ethanol production, *Bioresource Technology*, 2010, **101**, 4862-4874.
- 9 B. Digital, Raízen | Redefinindo o futuro da energia, <https://www.raizen.com.br/nossos-negocios/renovaveis>, (accessed 30 August 2023).
- 10 J. F. G. Antunes, C. A. M. Azania e A. A. P. M. Azania, Impactos ambientais das queimadas de cana-de-açúcar, *Revista Cultivar*, 2013.
- 11 C. Fortes, Master Thesis, Universidade de São Paulo, 2010.
- 12 L. P. Juttel, Uso da palha de cana na produção de bioenergia, *Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol*, 2011, <https://cnpem.br/en/uso-da-palha-de-cana-na-producao-de-bioenergia/>.
- 13 G. J. M. Rocha, A. R. Gonçalves, B. R. Oliveira, E. G. Olivares e C. E. V. Rossell, Steam explosion pretreatment reproduction and alkaline delignification reactions performed on a pilot scale with sugarcane bagasse for bioethanol production, *Industrial Crops and Products*, 2011, **35**, 274-279.
- 14 C. M. Aguiar, Master Thesis, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2010.

- 15 V. Ferreira-Leitão, L. Gottschalk, M. A. Ferrara, A. Nepomuceno, H. B. C. Molinari e E. P. S. Bon, Biomass Residues in Brazil: Availability and Potential Uses, *Waste and Biomass Valorization*, 2010, **1**, 65-76.
- 16 L. L. Zucco, A. L. Beraldo, Efeito da adição de cinza da casca de arroz em misturas cimento-casca de arroz, *Engenharia Agrícola*, 2008, **28**, 217-226.
- 17 V. F. N. Silva, Master Thesis, Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, 2009.
- 18 S. Zhu, Y. Wu, Y. Ziniu e J. Liao, Pretreatment by microwave/alkali of rice straw and its enzymic hydrolysis, *Process Biochemistry*, 2005, **40**, 3082-3086.
- 19 F. A. Santos, J. H. de Queiróz, J. L. Colodette, S. A. Fernandes, V. M. Guimarães e S. T. Rezende, Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol, *Química Nova*, 2012, **35**, 1004-1010.
- 20 P. Alvira e E. Tomás-Pejó, M. Ballesteros, M. J. Negro, Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review, *Bioresource Technology*, 2010, **101**, 4851- 4861.
- 21 T. L. Ogeda e D. F. S. Petri, Hidrólise Enzimática de Biomassa, *Química Nova*, 2010, **33**, 1549-1558.
- 22 S. Z. Monteiro, Avaliação da levedura *Pichia stipitis* na fermentação de hidrolisado de casca de arroz a bioetanol, *Salão de Iniciação Científica*, **22**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- 23 F. D. Mayer, R. Hoffman e J. E. Ruppenthal, Gestão energética, econômica e ambiental do resíduo casca de arroz em pequenas e médias agroindústrias de arroz, *XIII SIMPEP* - Bauru, São Paulo, 2006.