

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE RESÍDUOS DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO**Sabrina Rafaela dos Santos¹ (IC), Ana Laura P. de Melo¹ (IC), Ivan Felipe Silva dos Santos¹ (PQ)¹Universidade Federal de Itajubá**Palavras-chave:** Bagaço. Etanol de segunda geração. Palha. Resíduos da cana-de-açúcar. Sustentabilidade.**Introdução**

A cana-de-açúcar é a matéria prima principal da produção de açúcar e etanol, que por sua vez podem dar origem a diversos produtos como bioplástico, fármacos, bebidas, entre outros. Seu processamento leva a formação de alguns resíduos, sendo os principais a palha e bagaço, fundamentais para a produção do etanol de segunda geração (RAÍZEN, 2021).

O bagaço da cana-de-açúcar é um material lignocelulósico e principal parcela dos resíduos da cana no processo de obtenção do açúcar e etanol, sendo originado após a moagem do colmo da cana, que é separado em caldo e sua parte fibrosa, denominada bagaço (EPE, 2007). Esse resíduo é amplamente empregado na geração de vapor e eletricidade por meio da cogeração nas usinas sucroalcooleiras, sendo essencial para o funcionamento energético, além de eliminar um gasto adicional com energia (NOVACANA(b), [s.d.]). Recentemente, o bagaço tem se destacado na produção de etanol de segunda geração (MARTINS, 2014). Sua composição química é constituída por três principais substâncias: celulose, hemicelulose e lignina (CARLY, 2011).

A celulose é um polímero linear e semicristalino ligadas por ligações glicosídicas (β , 1 – 4). Esse tipo de ligação atribui resistência, flexibilidade e rigidez às fibras, o que torna indispensável a utilização de um pré-tratamento para clivar tal arranjo (CARVALHO, 2018). A hemicelulose, segundo maior componente do bagaço da cana-de-açúcar. Não apresenta estrutura cristalina, o que facilita o processo de hidrólise da mesma, além de possuir cadeias laterais, característica que está relacionada à elasticidade e flexibilidade. A lignina, por sua vez, é uma macromolécula formada por um material polifenólico amorfo e cadeia ramificada. Tais propriedades conferem força e rigidez à parede celular (CARLY, 2011). No caso da produção de etanol de segunda geração, esse componente deve ser removido da biomassa, para que a glicose proveniente da celulose possa ser manipulada (ALBUQUERQUE, 2016).

A palha da cana-de-açúcar consiste nas folhas secas e ponteiros depositados no solo, sua composição apresenta grande similaridade com o bagaço, entretanto, em diferentes quantidades. Estes índices são comparados na Tabela 1, a qual demonstra que, mesmo em proporções diferentes, a celulose é o principal componente de ambos os materiais (SANTOS, 2017).

Tabela 1 - Comparação entre as composições químicas do bagaço e palha

Material lignocelulósico	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Bagaço da cana	40,2	26,4	25,2
Palha da cana	44,4	30,7	19,8

Fonte: Adaptado de Santos, 2017

No contexto econômico, a cana-de-açúcar tem uma importância inegável. O Brasil é um dos principais produtores mundiais de açúcar e etanol, derivados da cana. A produção desses produtos exerce uma forte influência na economia do país, sendo responsável por cerca de 2% do seu Produto Interno Bruto (PIB) (UNICA, 2025). Além disso, o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar é uma alternativa valiosa aos combustíveis fósseis, contribuindo para uma matriz energética mais limpa e sustentável do Brasil, conforme aponta o Balanço Energético Nacional (BEN, 2023).

No entanto, é essencial considerar os desafios ambientais associados à produção de cana-de-açúcar. A expansão das plantações muitas vezes resulta em desmatamento e perda de biodiversidade, como demonstram informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) que em 2021 divulgou que a área de plantio dessa cultura quase bateu os 10 milhões de hectares no Brasil.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

A diferença entre o etanol 1G e 2G está no processo produtivo, uma vez que o etanol celulósico necessita de etapas prévias adicionais ao processo fermentativo, tais como o pré-tratamento e a hidrólise. Embora o processo de obtenção seja diferente, o produto final é quimicamente o mesmo, não havendo diferença entre esses dois tipos de álcoois (CAMARGO, 2023).

Uma vez que a lignina atua como barreira para que os açúcares da celulose e hemicelulose sejam atingidos, é necessário um pré tratamento para remover a lignina e hemicelulose, de modo a aumentar a exposição das fibras e reduzir a cristalinidade da celulose. Para isso, existem diversos processos de pré-tratamento, podendo ser físicos, químicos, biológicos ou mecânicos.

Com o acesso livre a celulose obtido pelo processo de pré-tratamento, é necessária a etapa de hidrólise para clivar os polissacarídeos, celulose e hemicelulose, em açúcares fermentescíveis, glicose e xilose respectivamente, viabilizando a etapa de fermentação subsequente. Esse processo pode ocorrer pela utilização de ácidos ou enzimas (ISIDORIO, 2022).

A hidrólise ácida utiliza compostos ácidos de alto rendimento nessa clivagem, dando origem às reações secundárias, uma vez que não é um procedimento específico para o meio (OGEDA e PETRI, 2010). Desse modo, a hidrólise enzimática, que consiste na utilização de enzimas específicas para catalisar a reação de clivagem da celulose e hemicelulose, é a mais usual, uma vez que atinge especificamente o sítio ativo da celulose sem que haja reações secundárias (CARLY, 2011 & OGEDA e PETRI, 2010). Neste caso, a reação de hidrólise tem como produto a glicose, a qual seria um inibidor da própria reação. Como forma de mitigar este efeito, faz-se a fermentação simultânea, de modo que a glicose sirva de substrato para a *Saccharomyces cerevisiae* (ZHANG, 2006).

Com o caldo formado por glicose e xilose, o processo de fermentação e destilação segue o mesmo do etanol 1G, agregando uma levedura geneticamente modificada para conversão da xilose em etanol (RAÍZEN, 2023), obtendo-se o Etanol 2G.

Neste cenário, visando otimizar a sustentabilidade e a eficiência da cadeia sucroenergética, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o potencial energético dos resíduos da cana-de-açúcar, especificamente a palha e o bagaço, para a produção de etanol de segunda geração.

Metodologia

Para estimar o potencial de produção de etanol de segunda geração (2G) a partir dos resíduos da cana-de-açúcar, foram utilizados dados do IBGE (2022) referentes à produção agrícola nacional. A partir da quantidade de cana produzida (Pc), calcularam-se os volumes de palha (Pp) e bagaço (Pb) com base nos índices de produção reportados na literatura. Para a palha, consideraram-se valores de 0,165 ton/ton de cana (OLIVEIRA, 2020) e 0,14 ton/ton de cana (NOVACANA, 2018), resultando em uma média de 0,1525 ton de palha por tonelada de cana. Já para o bagaço, adotou-se o índice de 0,276 ton/ton de cana (OLIVEIRA, 2020).

Como o bagaço apresenta cerca de 50% de umidade, o valor foi corrigido para base seca. Além disso, foram aplicados fatores de correção para perdas do processo, fixados em 45% para a palha e 15% para o bagaço, conforme dados de OLIVEIRA (2020), NOVACANA (2014) e ARANTES (2014). Dessa forma, obtiveram-se as produções corrigidas de palha e bagaço (Pp' e Pb').

Ressalta-se então, com base nos dados da literatura, que o bagaço é gerado em maior quantidade que a palha; contudo, devido ao maior teor de umidade do mesmo, a massa efetiva aproveitável após a secagem é inferior à quantidade inicialmente obtida.

Na etapa seguinte, calcularam-se os índices de produção de etanol celulósico. Para a palha, consideraram-se valores de 240 L/ton (OLIVEIRA *et al.*, 2020) e 215,05 L/ton (MESA *et al.*, 2018), obtendo-se uma média de 227,53 L/ton. Para o bagaço, adotou-se o valor mínimo de 158 L/ton (CARPIO & SOUZA, 2017) a fim de não superestimar a produção. A partir desses parâmetros, foi possível estimar a produção potencial de etanol de segunda geração a partir de ambos os resíduos, considerando a produção corrigida de biomassa e os índices de conversão em etanol.

Resultados e discussão

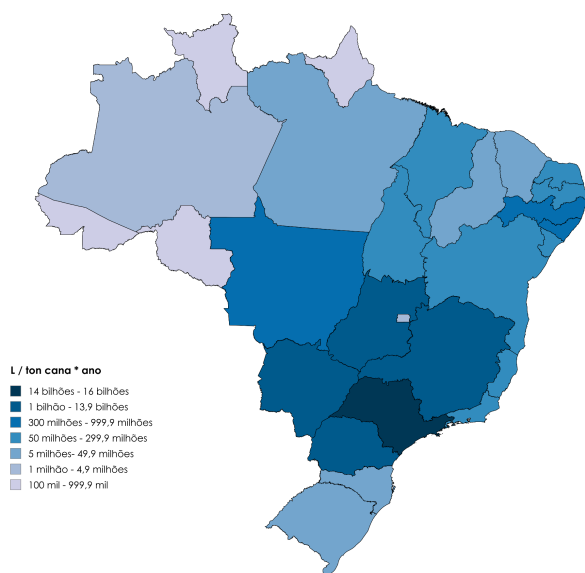
O Brasil apresenta elevado potencial para a produção de etanol de segunda geração (E2G), especialmente devido à disponibilidade de resíduos lignocelulósicos da cana-de-açúcar. A Região Sudeste concentra cerca de 69% da produção nacional, com destaque para São Paulo e Minas Gerais, o que também a torna a principal geradora de palha e bagaço, com 137,9 e 76,2 milhões de toneladas, respectivamente.

Os resultados deste estudo mostram que o Brasil pode atingir uma produção anual de 13,8 bilhões de litros de etanol a partir da palha e 13,4 bilhões a partir do bagaço,

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

totalizando cerca de 27,2 bilhões de litros. O estado de São Paulo, como ilustrado pela Figura 1, se destaca isoladamente, com mais de 15 bilhões de litros de potencial, considerando que essa é a região mais tecnológica e industrializada do país, a implantação inicial de plantas voltadas ao desenvolvimento desse biocombustível tende a ser mais viável e bem-aceita, com relação a questões logísticas e econômicas.

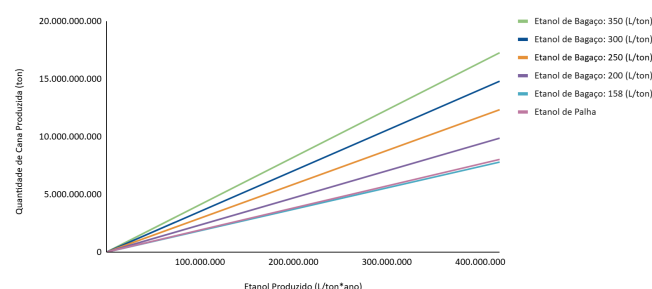
Figura 1 - Potencial de produção de etanol de segunda geração por estados do Brasil



A produção de etanol a partir da palha apresenta algumas vantagens técnicas, como menor teor de umidade e lignina, o que reduz etapas de pré-tratamento e favorece a conversão em açúcares fermentescíveis, contudo também apresenta algumas limitações, uma vez que exigiria etapas adicionais de coleta e transporte. O bagaço, por sua vez, apesar de exigir processos mais complexos, possui a vantagem de ser gerado diretamente nas usinas, o que explica seu uso predominante hoje. Como demonstrado na Figura 2, a fim de obter um cenário mais realista, foram analisados índices de rendimento do mais conservador até o mais otimista, baseado em CARPIO & SOUZA 2017. No cenário conservador, a palha apresenta maior potencial, mas em condições mais otimistas o bagaço pode superar esse desempenho. Ainda assim, verificou-se que, mesmo nesse caso, a palha mantém contribuição significativa. Isso mostra que a integração dos dois resíduos é fundamental para ampliar o potencial produtivo e

consolidar o conceito de biorrefinaria no setor sucroenergético.

Figura 2 - Gráfico Produção de Etanol 2G da palha e bagaço utilizando diferentes índices vs. Quantidade de cana produzida por ano.



Apesar do elevado potencial, a produção atual ainda é subestimada. Segundo a CONAB, na safra 2023/24 foram produzidos 37,2 bilhões de litros de etanol no Brasil, dos quais apenas 36 milhões foram de E2G, obtidos principalmente do bagaço (RAÍZEN, 2023). Tendo em vista o potencial, de 27,2 bilhões de litros, obtido nesse estudo, observa-se uma discrepância significativa entre capacidade técnica e realidade industrial, reflexo de barreiras logísticas, econômicas e tecnológicas. Ademais, essa diferença se explica pelo fato de que, neste trabalho, foi considerado o potencial produtivo de todas as cidades brasileiras. No entanto, esse cenário não reflete a realidade, uma vez que nem todas possuem infraestrutura adequada para a fabricação de etanol.

Conclusões

Os resultados demonstram que o Brasil possui elevado potencial para a produção de etanol de segunda geração a partir dos resíduos da cana-de-açúcar, podendo alcançar cerca de 27,2 bilhões de litros anuais. Observou-se que tanto a palha quanto o bagaço apresentam vantagens específicas, em cenários conservadores, a palha pode apresentar maior rendimento, mas em condições mais otimistas o bagaço pode superar sua produtividade, ressaltando a importância da integração de ambos os resíduos no conceito de biorrefinaria. Contudo, a produção industrial atual ainda é significativamente inferior ao potencial

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

estimado, reflexo de barreiras econômicas, tecnológicas e de infraestrutura. Assim, investimentos em inovação e políticas de incentivo são fundamentais para viabilizar a expansão do etanol 2G no país, promovendo maior sustentabilidade e diversificação da matriz energética brasileira.

Agradecimentos

Agradecemos ao Programa de Educação Tutorial Engenharia Ambiental UNIFEI pelo suporte e subsídio oferecido ao longo deste trabalho, contribuíram significativamente para o desenvolvimento da pesquisa.

Referências

- ALBUQUERQUE, Maria Évilyn Paiva. Avaliação da utilização do processo de explosão a vapor como pré-tratamento para extração de lignina acetosolv do bagaço de cana-de-açúcar. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- ARANTES, Danilo Campiom. Bagaço de cana-de-açúcar: análise térmica e energética de biomassa. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Energia 2030: geração termelétrica - biomassa*. Brasília: MME; EPE, 2007. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em: 22 nov. 2023.
- CAMARGO, Kelly Cristina. Estudo sobre a viabilidade de produção do etanol de primeira geração e etanol de segunda geração. 2023. Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2023.
- CARLI, Chanel Moacyr de. Hidrólise e fermentação do bagaço de cana-de-açúcar em escala de bancada para produção de etanol 2G. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.
- CARPIO, LGT; SOUZA, S. F. Alocação ótima de bagaço de cana-de-açúcar para produção de bioeletricidade e etanol de segunda geração no Brasil: Cenários de redução de custos. *Energia renovável*, v. 111, p. 771–780, 2017.
- CARVALHO, Janaína Alves. Estudo e caracterização de lignina de bagaço de cana-de-açúcar. 2018. Tese (Doutorado em Agroquímica) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balço Energético Nacional 2023: ano base 2022*. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 11 ago. 2024.
- ISIDORIO, Maria Andresa Santos. Etapas de pré-tratamento de bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol de segunda geração: uma revisão. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Tecnologia de Campinas, Campinas, 2022.
- MARTINS, F. A.; MARTIM, T.; CORRÊA, A. M.; OLIVEIRA, F. F. de. *A produção do Etanol de segunda geração a partir do bagaço da cana-de-açúcar*. *Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção*, v. 2, n. 3, p. 5–16, 2014.
- MESA, Leyanis et al. Ethanol production from sugarcane straw using different configurations of fermentation and techno-economical evaluation of the best schemes. *Renewable Energy*, v. 156, p. 377–388, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120306236>. Acesso em: 05 maio 2024.
- NOVACANA(b). Cogeração: como funciona a produção de energia elétrica. [s.d.]. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/cogerao-como-funciona-producao-energia-eletrica>. Acesso em: 01 jun. 2024.
- NOVACANA. Matérias-primas do etanol de 2ª geração. 2018. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/materias-primas>. Acesso em: 14 set. 2023.
- OGEDA, Thais Lucy; PETRI, Denise F. S. Hidrólise enzimática de biomassa. *Química Nova*, v. 33, n. 7, p. 1549–1558, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000700023>. Acesso em: 08 abr. 2025.
- OLIVEIRA, Manoel Henrique Reis de et al. Gestão dos resíduos pós-colheita da cana-de-açúcar no cerrado: uso da palhada versus contribuição econômica. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 1, p. 3406–3421, jan. 2020. Disponível em: <https://brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/view/246>. Acesso em: 17 mar. 2024.
- OLIVEIRA, Raul Alves de et al. Energy supply design for the integrated production of 1G + 2G ethanol from sugarcane. *Renewable Energy Focus*, v. 35, p. 171–173, dez. 2020.
- RAÍZEN. Cana-de-açúcar: tudo sobre a planta que move o Brasil. Blog Raízen, 2021. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/cana-de-acucar>. Acesso em: 29 nov. 2023.
- RAÍZEN. Etanol de segunda geração: o que é e como funciona? Blog Raízen, 2023. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/etanol-de-segunda-geracao>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- SANTOS, Felipe Augusto. Hidrólise enzimática da palha de cana-de-açúcar pré-tratada com hidróxido de sódio. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.
- UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Observatório da Cana e Bioenergia: Fotografia do setor sucroenergético no Brasil e no Estado de São Paulo e os benefícios econômicos, ambientais e sociais gerados. São Paulo: UNICA, 2025. 12 p.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

ZHANG, Y.-H. Percival; HIMMEL, Michael E.; MIELENZ, Jonathan R. Outlook for cellulase improvement: screening and selection strategies. *Biotechnology Advances*, v. 24, p. 452–481, 2006.