

TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS E BIOCOMBUSTÍVEIS: DESAFIOS E PERSPECTIVAS PARA REDUÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

J. P. Araújo, K. S. Campos, L. S. Borges, T. F. Ferreira, W. L. Oliveira, W. L. Oliveira, D. A. R. Castro

Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil, karoline.campos@ufam.edu.br

Os artigos analisados abordam tecnologias sustentáveis para produção de energia renovável e controle ambiental. Os estudos destacam o potencial da biomassa e dos biocombustíveis, o uso de carvões ativados para adsorção de COVs e a conversão de resíduos de agave em biocombustíveis de segunda geração. Em conjunto, evidenciam alternativas para reduzir impactos ambientais e promover processos mais sustentáveis.

Palavras-chave: biocombustíveis; biomassa; energia renovável; sustentabilidade; resíduos agroindustriais.

INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda energética mundial e a intensificação dos problemas ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis têm impulsionado o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis para a geração de energia e o controle da poluição. A emissão de gases de efeito estufa, a degradação dos recursos naturais e a geração inadequada de resíduos representam alguns dos principais desafios enfrentados pela sociedade contemporânea, exigindo soluções inovadoras que conciliem desenvolvimento econômico e preservação ambiental.

Nesse contexto, as tecnologias sustentáveis e os biocombustíveis têm se destacado como importantes ferramentas para a transição energética. Os biocombustíveis, especialmente os de segunda geração, apresentam vantagens por utilizarem biomassa residual e resíduos agroindustriais como matéria-prima, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para o aproveitamento de materiais que, de outra forma, seriam descartados. Além disso, avanços tecnológicos voltados ao tratamento de poluentes gasosos em nível industrial demonstram o papel fundamental da inovação científica na mitigação dos impactos ambientais.

Diversos estudos recentes têm investigado diferentes estratégias para promover processos ecoeficientes. Destacam-se as pesquisas voltadas ao aperfeiçoamento de carvões ativados modificados para a adsorção de Compostos Orgânicos Voláteis

(COVs) em ambientes úmidos (GUO et al., 2024); a conversão biotecnológica de resíduos de Agave sisalana (sisal) em bioetanol de segunda geração (RIVA et al., 2025); e a avaliação do potencial logístico e regional da biomassa de cana-de-açúcar para a produção de bioquerosene de aviação no cenário brasileiro (SILVA et al., 2024). Essas investigações evidenciam que a integração entre desenvolvimento tecnológico e valorização de coprodutos agroindustriais é a chave para a sustentabilidade.

Diante desse cenário, o presente trabalho realiza uma revisão bibliográfica de três estudos científicos de vanguarda focados em tecnologias sustentáveis e biocombustíveis. Os objetivos deste trabalho consistem em: analisar as metodologias e ferramentas aplicadas nos artigos selecionados; compreender os processos tecnológicos empregados na produção de biocombustíveis avançados e no controle de emissões atmosféricas; e discutir os principais resultados, limitações e perspectivas dessas rotas tecnológicas para a redução dos impactos ambientais.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica baseada na análise de três estudos científicos sobre tecnologias sustentáveis aplicadas à produção de biocombustíveis e ao controle da poluição atmosférica. A seleção dos artigos priorizou pesquisas recentes que apresentassem metodologias inovadoras e resultados relevantes para a redução dos impactos ambientais.

O primeiro estudo analisado, de Guo et al. (2024), corresponde a uma pesquisa experimental, na qual os próprios desenvolveram, modificaram e caracterizaram carvões ativados hidrofóbicos, avaliando seu desempenho na adsorção de compostos orgânicos voláteis (COVs) em condições de alta umidade por meio de ensaios laboratoriais.

O segundo estudo, de Riva et al. (2025), consiste em uma revisão bibliográfica baseada na análise de 9 artigos científicos sobre a conversão de resíduos de Agave sisalana em biocombustíveis de segunda geração. Os autores compararam diferentes métodos de pré-tratamento, sacarificação enzimática e fermentação, avaliando indicadores como rendimento de açúcares fermentáveis e produção de etanol.

O terceiro estudo, de Santana et al. (2024), é uma pesquisa original fundamentada na análise de dados secundários provenientes de bases oficiais, como ANEEL, ANP, EPE e IBGE, além da aplicação do indicador Quociente Locacional (QL) para avaliar o potencial regional de produção de biomassa destinada ao bioquerosene de aviação.

A análise desses artigos teve o objetivo de entender as metodologias usadas, as ferramentas utilizadas, os processos tecnológicos aplicados e as conclusões alcançadas pelos autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modificação de carvões ativados para aprimorar a adsorção de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) em ambientes de alta umidade

Este artigo aborda a alteração de carvões ativados visando aprimorar a captura de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs), sobretudo em cenários de alta umidade, onde a performance do carvão ativado usual costuma diminuir. Foram elaborados dois tipos de carvão ativado alterado: P/AC: carvão ativado coberto com PTFE (politetrafluoretileno), uma substância reconhecida por sua acentuada repelência à água; PSP/AC: carvão ativado que obteve uma camada adicional de PDMS/SiO₂ sobre a cobertura de PTFE, resultando numa estrutura repelente à água de duas camadas. O intuito dessas alterações foi intensificar a resistência à água sem prejudicar a habilidade de capturar os poluentes gasosos. Para verificar a eficácia dos materiais, foram conduzidos ensaios empregando: Tolueno, Acetona, e combinações destes dois COVs, nas seguintes condições: sem umidade, e com umidade.

As conclusões revelaram que os carvões ativados alterados exibiram: uma hidrofobicidade superior;

uma capacidade de captura elevada em ambientes úmidos; uma estabilidade operacional ampliada; e uma boa aptidão para regeneração, possibilitando seu reaproveitamento após o procedimento de captura. A pesquisa ilustra que as coberturas hidrofóbicas em carvão ativado podem representar uma alternativa promissora para sistemas de tratamento de gases industriais que contenham COVs, especialmente em processos com alta concentração de vapor d'água, algo frequente em aplicações ambientais e industriais.

Potencial dos resíduos de agave sisalana na produção de biocombustíveis de segunda geração: revisão crítica de rotas tecnológicas e viabilidade industrial

Como o estudo se trata sobre biocombustíveis da segunda geração, temos que a produção de bioetanol da segunda geração passa por 3 etapas sequenciais: pré-tratamento, sacarificação enzimática e fermentação. (Aguilar et al., 2018). Entretanto, existem diversas formas de executar essas etapas, assim a eficiência dependia diretamente do método de pré-tratamento e hidrólise enzimática aplicados e das condições do processo de fermentação. (Caspeta et al., 2014). Para avaliar essa eficiência os autores compararam os resultados dos seguintes 9 artigos, como mostrado na Tabela 1, considerando parâmetros como rendimento de açúcares fermentáveis, rendimento teórico de etanol, concentração final de etanol, tipos de levedura utilizados e o emprego de tecnologias alternativas, como líquidos iônicos e solventes orgânicos.

Analisando as compensações de cada estudo, temos que o trabalho de Pérez-Pimienta et al. (2017) por utilizar líquidos iônicos sendo uma boa alternativa contra impactos ambientais e bons resultados de conversão de açúcares é um processo extremamente caro e complexo, isto também se aplica na pesquisa de Caspeta et al. (2014), que utiliza solventes orgânicos, e Flores Gómez et al. (2018), que utiliza expansão de amônia (AFEX), apesar dos altos rendimentos teóricos em etanol o custo operacional ainda é um embate. Os estudos com maior rendimento de etanol pertencem a Rios-González et al. (2016) e Aguirre-Fierro et al. (2020), porém com a menor recuperação de açúcares em relação aos estudos. Além disso, os trabalhos de Ávila-Gaxiola et al. (2020) e Shiva et al. (2023), que apresentam alternativas de pré-tratamento menos complexas, apesar de não possuírem os maiores rendimentos de sacarificação. Outrossim, a produtividade do processo fermentativo de Delfin-Ruiz et al. (2021)

teve um ótimo resultado com 0,49g/g que é aproximadamente 92% de rendimento teórico do etanol, porém a falta da recuperação de açúcares dificulta a comparação total da pesquisa. Por fim, Rijal et al. (2016) que apesar do menor custo inicial por utilizar hidrólise com ácido sulfúrico, a periculosidade do processo, pela formação de corrosivos que podem comprometer os equipamentos, assim não sendo tão viável diante de resultados medianos de conversão.

Por fim, o valor da pesquisa reside em atuar como balizador teórico para investigações futuras. Para materializar as projeções otimistas, a comunidade científica deve avançar da revisão bibliográfica para o desenvolvimento experimental em laboratório e na indústria. Portanto, é preciso que os próximos estudos priorizem a otimização dos pré-tratamentos e a comparação detalhada das rotas biotecnológicas, preenchendo o hiato operacional e viabilizando a implementação industrial do agave como vetor energético.

Produção de biomassa e biocombustíveis de aviação: perspectivas regionais no Brasil

O artigo visa a busca de alternativas para evitar o aumento do uso de combustíveis fósseis e assim baixar a emissão de CO₂ na atmosfera ou também chamada descarbonização; uma das alternativas é a utilização de biomassa para a produção destes combustíveis, pois de acordo com a legislação é permitido combustíveis com essa matéria-prima. A

matéria-prima utilizada foi o bagaço da cana-de-açúcar por ser a rota ideal para a sua utilização para formação de bioquerosene de aviação.

Os resultados do artigo visam para a produção do bioquerosene e necessidades de biomassa refletindo sobre a alta taxa de bagaço de cana para produzir o bioquerosene, gráfico 1; outro ponto em destaque é acerca do potencial de produção de energia a partir da biomassa da cana Ricardo et al. (2024) que relatam sobre a disponibilidade dos estados do Brasil para a produção de cana-de-açúcar, sendo Rio de Janeiro, Mato Grosso do Sul e Paraná com mais disponibilidade para a realização dessa atividade.

Entretanto, os principais desafios identificados estão relacionados aos aspectos tecnológicos da produção. Ainda são necessários avanços nos processos de conversão da biomassa em bioquerosene, visando aumentar a eficiência, reduzir custos e tornar a produção viável em larga escala. Além disso, a otimização das tecnologias de processamento, a melhoria do rendimento da biomassa e o desenvolvimento de métodos mais sustentáveis representam obstáculos que precisam ser superados para ampliar a utilização desse combustível na aviação. Dessa forma, o artigo evidencia que, embora o bioquerosene produzido a partir da biomassa seja uma alternativa promissora para a redução das emissões de CO₂, seu avanço depende do desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e economicamente competitivas.

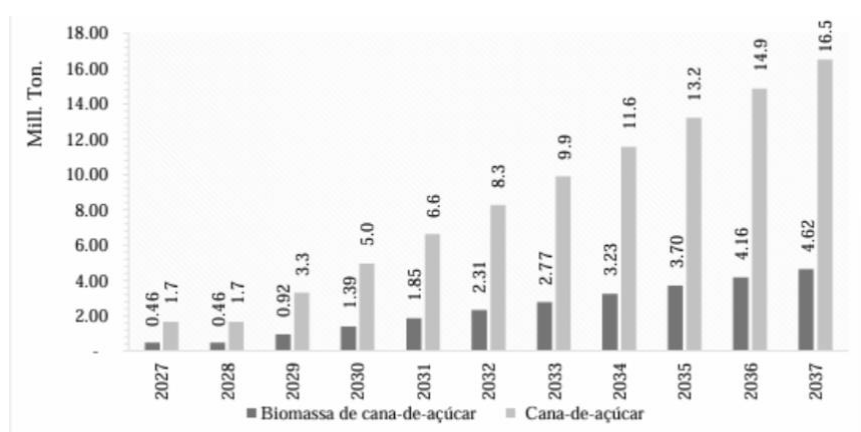


Figura 1. Necessidade de cana-de-açúcar e biomassa de cana para a produção de SAF – Brasil, 2027 – 2037 (milhões toneladas)

Tabela 1. Principais pré-tratamentos revisados e respectivos rendimentos de etanol.

ESTUDO	MATÉRIA -	PRÉ-TRATAMENTO	AÇÚCARES	ETANOL
--------	-----------	----------------	----------	--------

PRIMA

Rios-González et al (2017)	Bagaço	Auto-hidrólise	74,3	98,4% de teor teórico
Flores-Gómez et al (2018)	Bagaço e folhas	Expansão com amônia (AFEX)	>85	>40 g/L
Caspeta et al (2014)	Bagaço	Etanosolv	91	86% de teor teórico
Ávila-Gaxiola e Ávila-Gaxiola et al (2022)	Folhas	Moagem seca + hidrólise	86,4	81% de teor teórico
Rijal et al (2016)	Folhas	H2SO4 2%, 60 min, 121°C	70	38,6 g/L (bagaço); 12,4 g/L (suco)
Delfin-Ruiz et al (2021)	Bagaço	Alcalino otimizado	Não reportado	0,47 g/g; 1,97 g/L/h
Pérez-Pimienta et al (2017)	Bagaço	Líquidos iônicos + Organosolv	>90 glucana, 83 xilana	121-127 kg/100 kg
Aguirre-Fierro et al (2020)	Bagaço	Hidrotérmico oxidativo	75,8	110,5 g/L
Shiva et al (2023)	Bagaço	Auto-hidrólise	82,58	40,98 g/L glicose

CONCLUSÃO

Os resultados apresentados nestas análises reforçam o grande potencial dos resíduos agroindustriais para impulsionar soluções mais sustentáveis, tanto na geração de energia renovável quanto no controle ambiental.

Observamos que a biomassa residual, especialmente o bagaço de agave, se mostra bastante promissora para a produção de biocombustíveis de segunda geração, como o etanol. Ao mesmo tempo, as pesquisas sobre modificações em carvões ativados indicam progressos importantes na remoção de poluentes gasosos (COVs), mesmo em condições de alta umidade.

Além disso, os dados mostram que o bagaço de cana-de-açúcar é uma via real para a produção de bioquerosene de aviação no Brasil, ajudando a baixar a emissão de CO2 na atmosfera. Este trabalho, ao fazer um balanço sobre essas tecnologias, buscou entender os pontos positivos e negativos de cada uma. Contudo, apesar de termos dados de mercado e projeções de custos interessantes, ainda notamos uma falta de metodologias claras sobre como produzir essa biomassa e como otimizar esses processos na prática.

Portanto, os estudos aqui discutidos deixam claro que a valorização de resíduos ajuda tanto o meio ambiente quanto o desenvolvimento de novas tecnologias. Mas, para que essas propostas saiam do papel e cheguem à indústria, ainda precisamos de mais investigações focadas em validar se tudo isso

funciona bem e de forma econômica em situações reais de operação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Prof. Douglas Alberto Rocha de Castro pela orientação, apoio e contribuições científicas fundamentais para a realização deste trabalho. Agradecemos também aos autores das obras analisadas, à instituição de ensino e às plataformas de pesquisa utilizadas.

REFERÊNCIAS

- GUO, Jiaxiu et al. Modificação hidrofóbica de carbono poroso derivado de biomassa de casca de noz para a adsorção de COVs em alta umidade. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], 2024. Disponível em: [sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com). Acesso em: 28 maio 2026.
- RIVA, M.; CECCHIN, D.; PAES, J. L.; SIQUEIRA, G. B. Produção de biocombustíveis a partir de resíduos de agave: uma revisão sistemática. **Revista Sítio Novo**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 1-14, 2025.
- SILVA, G. et al. Produção de biomassa e biocombustíveis de aviação: perspectivas regionais no Brasil. In: **ENABER – ENCONTRO NACIONAL DE BIOENERGIA, 2024. Anais** [...]. Brasil, 2024. Disponível em: <https://brsa.org.br/wp-content/uploads/wpcf7-submissions/32010/PRODUCAO-DE-BIOMASSA-E-BIOCOMBUSTIVEIS-DE-AVIACAO.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2026.