



Scientific Electronic Archives

Issue ID: Vol.18 (4), July/August 2025, p. 1-9

DOI: <http://dx.doi.org/10.36560/18220252096>

+ Corresponding author: maria_mascarenhas@outlook.com

Aproveitamento de subprodutos da biomassa da cana-de-açúcar: potencial tecnológico na bioeconomia e transição energética

Technological valorization of sugarcane biomass by-products: contributions to the bioeconomy and energy transition

Eliane Ferreira de Souza ¹, Nathan Ponte Araújo ², Maria do Socorro Mascarenhas ², Margareth Batistote ²

¹ SENAI - Departamento Regional do Mato Grosso do Sul, Brasil

² Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul

Resumo. O bagaço de cana-de-açúcar é amplamente utilizado na cogeração de energia nas usinas sucroenergéticas brasileiras, gerando, como subprodutos, fuligem e cinzas com elevado potencial de aproveitamento. Este estudo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica qualitativa sobre a formação, composição química e possibilidades de reaproveitamento da fuligem resultante da queima do bagaço, à luz dos princípios da bioeconomia e da transição energética. A busca foi conduzida na base ScienceDirect e em documentos técnicos, considerando publicações entre 2020 e 2025 que abordassem usos sustentáveis desses resíduos. Os dados foram organizados por temas e analisados interpretativamente. Os resultados apontam que a fuligem, composta por partículas finas ricas em carbono amorfo, pode ser convertida em nanomateriais (como nanotubos e grafeno), adsorventes ambientais, pigmentos industriais e aditivos para cimento. As cinzas, por sua vez, apresentam viabilidade como corretivos de solo e insumos para materiais à base de carbono. Conclui-se que os subprodutos da queima do bagaço devem ser tratados como recursos estratégicos em uma abordagem circular, promovendo inovação, sustentabilidade industrial e redução da dependência de insumos fósseis. O aproveitamento desses resíduos fortalece o conceito de biorrefinaria e contribui para uma matriz energética mais limpa e resiliente.

Palavras-chaves: Resíduos agroindustriais, cinzas, fuligem, economia circular

Abstract. The sugarcane bagasse is widely used for cogeneration in Brazilian bioenergy plants, producing soot and ash as by-products with significant recovery potential. This study aims to conduct a qualitative literature review on the formation, chemical composition, and reuse potential of soot resulting from bagasse combustion, aligned with the principles of bioeconomy and energy transition. The literature search was carried out using the ScienceDirect database and technical documents, considering publications from 2020 to 2025 that addressed sustainable uses of these residues. Data were thematically organized and interpretively analyzed. The results show that soot, composed of fine particles rich in amorphous carbon, can be converted into nanomaterials (such as nanotubes and graphene), environmental adsorbents, industrial pigments, and cement additives. Ashes also show potential for use as soil amendments and inputs for carbon-based materials. It is concluded that bagasse combustion by-products should be considered strategic resources within a circular approach, promoting industrial innovation, sustainability, and reduced reliance on fossil inputs. The valorization of these residues strengthens the biorefinery concept and supports the transition toward a cleaner and more resilient energy matrix.

Keywords: Agro-industrial residues, ashes, soot, circular economy

Introdução

Nas últimas décadas, a matriz energética global tem sido fortemente sustentada pela exploração de fontes fósseis não renováveis, como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural. Esse modelo de desenvolvimento, historicamente consolidado desde a Revolução Industrial, permanece como alicerce das atividades industriais,

de transporte e geração elétrica em grande parte do planeta (WITTMANN; ARICI; MEISSNER, 2021). No entanto, embora eficientes em termos energéticos, essas fontes apresentam limitações severas do ponto de vista ambiental, social e econômico. Além de serem finitas, sua extração, processamento e queima estão entre as principais causas das emissões de gases de efeito estufa (GEE), que

agravam o aquecimento global e intensificam os efeitos das mudanças climáticas (NUNES, 2023; FILONCHYK et al., 2024).

A combustão de combustíveis fósseis é responsável pela emissão massiva de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxidos de nitrogênio (NO_x), gases com elevado potencial de retenção de calor na atmosfera (OJADI et al., 2023; SHOAI B et al., 2025). Além disso, esse processo acelera a acidificação das águas, como oceanos, devido à absorção de CO₂, e contribui significativamente para a poluição atmosférica, afetando diretamente a saúde pública em áreas urbanas e industrializadas (FALKENBERG et al., 2020; EDO et al., 2024). Os níveis de material particulado e ozônio troposférico frequentemente ultrapassam os limites estabelecidos por organismos internacionais como a Organização Mundial da Saúde (OMS), evidenciando os impactos deletérios desse modelo energético sobre a qualidade de vida humana (ZHONG et al., 2023). Segundo Hassan et al. (2024), cerca de 80% da energia global ainda é derivada de fontes fósseis, com crescimento médio anual estimado em 2%, o que torna a transição para fontes renováveis uma necessidade urgente e inadiável.

Diante desse contexto, a diversificação da matriz energética, com ênfase em fontes limpas, renováveis e de baixo impacto ambiental, tem se tornado uma prioridade em diversas agendas internacionais (AKPAN; OLANREWAJU, 2023). Energias como a solar, a eólica, a hidráulica e a bioenergética emergem como alternativas viáveis para promover segurança energética, redução da pegada de carbono e sustentabilidade de longo prazo (KABEYI; OLANREWAJU, 2022). Nesse cenário, a biomassa tem se consolidado como uma das soluções mais promissoras, especialmente em países com grande disponibilidade de recursos agrícolas e florestais (KALAK, 2023). Por definição, biomassa refere-se a todo tipo de matéria orgânica de origem vegetal ou animal que pode ser convertida em energia, seja por combustão direta, processos termoquímicos ou fermentativos (TURSİ; OLIVITO, 2021; ASAAD et al., 2024).

Além disso, a biomassa desempenha um papel central no conceito de bioeconomia, que propõe um modelo de desenvolvimento baseado no uso racional de recursos biológicos renováveis, integrando inovação tecnológica, redução de impactos ambientais e geração de valor a partir de resíduos (WEI et al., 2022). Entre suas vantagens estão a renovabilidade, a possibilidade de armazenamento, o aproveitamento de resíduos agroindustriais e a contribuição para o equilíbrio do ciclo do carbono (RANI et al., 2023). Rocha-Meneses et al. (2023), salienta que quando empregada de forma sustentável, a biomassa contribui não apenas para a diversificação da matriz energética, mas também para o desenvolvimento socioeconômico regional, sobretudo em territórios com vocação agrícola, como o Brasil.

Nesse contexto, a cana-de-açúcar se destaca como a principal cultura energética brasileira e uma das mais importantes do mundo. O setor sucroenergético nacional é referência global em tecnologia de produção e eficiência na geração de biocombustíveis e bioeletricidade (SANTOS JÚNIOR et al., 2025). Além da produção de etanol anidro e hidratado, utilizado como combustível veicular, o bagaço de cana-de-açúcar — resíduo gerado após a extração do caldo — é amplamente utilizado como biomassa energética para a cogeração de energia térmica e elétrica (PALACIOS-BERECHE et al., 2022). Rico em celulose, hemicelulose e lignina, esse subproduto possui elevado poder calorífico e é fundamental para a geração de bioeletricidade, uma fonte limpa e renovável que contribui de forma significativa para a matriz elétrica brasileira, sobretudo durante os períodos de seca que afetam os reservatórios hidrelétricos (PANDIT et al., 2021; SHARMA et al., 2023).

No entanto, apesar dos inúmeros benefícios ambientais e econômicos associados à utilização do bagaço como combustível, sua queima controlada em caldeiras industriais gera um subproduto particulado denominada fuligem (TOMLIN, 2021). Trata-se de um resíduo composto majoritariamente por carbono, sílica, metais traço e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) de acordo com Yin et al. (2023) e Liu et al. (2020). A fuligem é formada em zonas de pirólise incompleta, especialmente em regiões de chama rica em combustível (MICHELSEN et al., 2020). A emissão de material particulado fino, associado à presença de fuligem, representa um risco à saúde humana e ao meio ambiente, além de comprometer o desempenho dos equipamentos industriais, exigindo rotinas periódicas de manutenção e limpeza de dutos e caldeiras (ZHANG et al., 2021; SUMATHI et al., 2025).

Contudo, estudos recentes têm demonstrado que, apesar de ser tratada como resíduo, a fuligem apresenta características físico-químicas que a tornam potencialmente valiosa para diversas aplicações industriais (SAINI et al., 2021). Sua estrutura porosa e alto teor de carbono favorecem o seu uso como adsorvente natural, podendo substituir materiais mais caros em processos de purificação de efluentes ou recuperação de metais (ANDERSON et al., 2022). Além disso, pode ser utilizada como matéria-prima na produção de carvão ativado, fertilizantes agrícolas, materiais cerâmicos ou insumos para polímeros tecnológicos, inserindo-se em cadeias produtivas de maior valor agregado e reduzindo a pressão por descarte inadequado (AYACH et al., 2024).

A fuligem, portanto, assume uma dupla natureza, sendo por um lado, um resíduo industrial com potenciais impactos ambientais e por outro, representa uma oportunidade de reaproveitamento no contexto da economia circular e da bioeconomia (TOLISANO; DEL BUONO, 2023). A caracterização

detalhada da fuligem, o entendimento de seus mecanismos de formação e a investigação de seus usos sustentáveis tornam-se fundamentais para promover sua valorização e mitigar seus efeitos negativos. Diante desse panorama, o presente estudo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a formação, composição química e potencial de reaproveitamento da fuligem oriunda da queima do bagaço de cana-de-açúcar alinhada aos princípios da bioeconomia e da transição energética.

Material e métodos

Este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo, com o objetivo de reunir e analisar publicações que abordem a formação, a composição química e o potencial de reaproveitamento da fuligem oriunda da queima do bagaço de cana-de-açúcar. A revisão foi fundamentada nos princípios da bioeconomia e da transição energética, com foco na valorização de resíduos agroindustriais.

A busca por materiais foi realizada utilizando as bases de dados *ScienceDirect*. Também foram consultados documentos técnicos. Foram utilizados termos de busca em português e inglês, como: “fuligem do bagaço de cana”, “bagasse soot”, “pirólise de biomassa”, “bioeconomia”, “valorização de resíduos”. E adotados critérios de inclusão como:

- ✓ Publicações entre 2020 e 2025;
- ✓ Estudos com enfoque na fuligem da queima de biomassa, especialmente do bagaço de cana;
- ✓ Trabalhos que discutissem usos sustentáveis e reaproveitamento de resíduos.
- ✓ Os critérios de exclusão foram:
- ✓ Trabalhos sem relevância direta com o tema;
- ✓ Fontes sem embasamento técnico-científico confiável.

As informações obtidas foram organizadas por temas, como: processos de combustão, composição da fuligem, impactos ambientais e usos alternativos. A análise foi interpretativa, destacando as contribuições e lacunas do conhecimento existente.

Resultados e discussão

A composição do bagaço de cana-de-açúcar é um dos fatores determinantes de seu potencial biotecnológico e energético, conferindo-lhe características estratégicas para aplicações sustentáveis, sendo constituído por celulose, a fração mais abundante, variando entre 40% e 50% da biomassa. Trata-se de um polímero linear de glicose com ligações β -1,4-glicosídicas, cuja estrutura cristalina confere elevada resistência mecânica à parede celular vegetal. A hemicelulose, 20% a 30% do bagaço, possui uma estrutura menos ordenada e é formada por uma diversidade de monossacarídeos, como xilose, arabinose, galactose e manose. Essa heterogeneidade

estrutural resulta em maior susceptibilidade à degradação, facilitando a liberação de açúcares que podem ser aproveitados na fermentação para obtenção de bioetanol e outros produtos industriais. Ao contrário da celulose, a hemicelulose apresenta estrutura amorfa e ramificada, o que favorece seu uso em processos de conversão biológica mais eficientes (Figura 1).

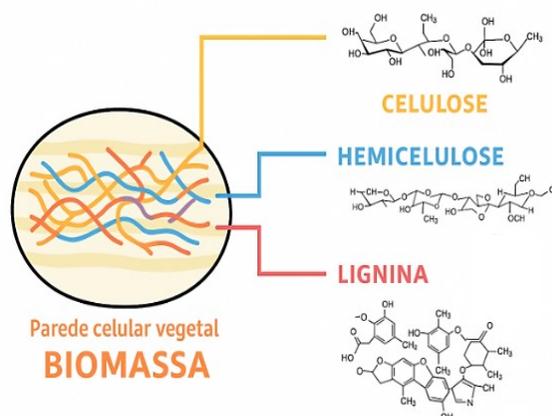


Figura 1. Estrutura da parede celular da biomassa lignocelulósica. Fonte: CUNHA, 2020

A celulose do bagaço de cana, embora naturalmente resistente à degradação devido à sua estrutura cristalina, pode ser convertida em açúcares fermentescíveis por hidrólise enzimática ou ácida, sendo essencial para a produção de etanol de segunda geração (E2G) e outros biocombustíveis avançados (WANI et al., 2023). No setor sucroenergético brasileiro, o bagaço é amplamente empregado na cogeração de energia térmica e elétrica, promovendo a autossuficiência energética das usinas. O processo inicia-se com a pré-secagem do bagaço, reduzindo sua umidade para cerca de 45–50% e aumentando a eficiência da combustão (PALACIOS-BERECHE et al., 2022). Em seguida, o material seco é queimado em caldeiras de alta pressão com sistemas de grelhas ou leito fluidizado, sob combustão controlada. Durante a queima, ocorrem três etapas termoquímicas: pirólise (200–500 °C), liberando gases, alcatrões e carvão; oxidação dos voláteis com liberação de calor; e combustão do carvão residual a temperaturas superiores a 800 °C (LUO; ZHOU, 2022). O calor gerado aquece a água nas caldeiras, produzindo vapor de alta pressão utilizado para acionar turbinas elétricas ou em processos industriais, como a destilação do etanol (NHIEN; VAN DUC LONG; LEE, 2021).

O bagaço de cana-de-açúcar é um recurso energético valioso no Brasil (Tabela 1). Além de ser um subproduto abundante do processamento da cana, ele possui características energéticas favoráveis que permitem sua utilização eficiente na geração de calor e eletricidade. Esse aproveitamento contribui para a redução da dependência de fontes fósseis, promove o uso de energia renovável e garante maior autonomia às

usinas. Além disso, a energia excedente pode ser comercializada, gerando receita adicional e fortalecendo a sustentabilidade econômica e ambiental do setor sucroenergético.

Tabela 1. Parâmetros técnicos do bagaço de cana-de-açúcar para a cogeração de bioenergia

Parâmetro	Valor Médio Estimado	Referencias
Umidade do bagaço (após moagem)	45–50%	Powar et al. (2022)
Poder calorífico inferior (PCI) do bagaço seco	4.000–4.500 kcal/kg	Da Silva E De Lima (2020); Kulshreshtha et al.(2023)
Quantidade de bagaço gerada por tonelada de cana	250–300 kg	Kabeyi EOlanrewaju (2023)
Energia elétrica gerada por tonelada de cana moída	100–130 kWh	Kabeyi EOlanrewaju (2023)
Eficiência térmica das caldeiras	65–85%	Elwardany (2024)
Potência instalada do setor (biomassa - bagaço)	~11.000 MW	Srivastava (2021)
Participação do bagaço na geração elétrica da biomassa	75–80%	Nosenzo (2024)

A cogeração com bagaço representa uma alternativa limpa e renovável, que contribui para a diversificação da matriz energética brasileira. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), apresenta benefícios como:

- ✓ Substituição de fontes fósseis e mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE);
- ✓ Valorização de resíduos agroindustriais, alinhando-se aos princípios da bioeconomia e economia circular;
- ✓ Geração de empregos e estímulo ao desenvolvimento regional;
- ✓ Estabilidade energética em períodos de estiagem, quando a capacidade hídrica nacional é reduzida.

A queima do bagaço também está associada à formação subproduto da combustão como as cinzas e a fuligem (Figura 2). As cinzas são ricas em minerais, com potencial uso como corretivos de solo ou aditivos industriais (THOMAS et al., 2021). A fuligem, composta por partículas aglomeradas com diâmetros na escala de centenas de nanômetros. Essas partículas apresentam estrutura extremamente fina, composta por unidades primárias esféricas (YAN et al., 2024). A fuligem se forma por meio da pirólise das moléculas de combustível em regiões ricas em combustível da chama, levando à geração de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), como o acetileno (C₂H₂), que é um dos precursores mais importantes nesse processo (ALTARAWNEH; ALI, 2024). A multimerização desses PAHs resulta no aumento da superfície das partículas e favorece processos como nucleação e crescimento superficial (LÓPEZ-CÁMARA et al., 2023).

A formação de fuligem varia de acordo com o tipo de chama e o combustível utilizado. Em chamas pré-misturadas, em que há excesso de

combustível, a tendência de formação de fuligem segue a ordem decrescente: acetileno, álcoois, aromáticos, olefinicos e parafínicos (ALTARAWNEH; ALI, 2024). Em contrapartida, em chamas difusas, a formação ocorre de forma inversa, sendo mais intensa com parafínicos e menos com acetileno, nessas condições, a pirólise é mais significativa nas regiões próximas à oxidação, caracterizando a natureza das chamas difusas (XI et al., 2021).

Dessa forma, o bagaço de cana-de-açúcar se consolida como um recurso estratégico para a transição energética e para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. Seu uso eficiente promove a valorização de resíduos, fortalece a bioeconomia e contribui para a mitigação dos impactos ambientais da matriz energética convencional.

As cinzas e a fuligem oriundas de processos de queima representam resíduos com elevado potencial de aproveitamento em distintas aplicações industriais (Figura 3). Sua valorização como insumos estratégicos contribui para a inserção desses materiais em novos ciclos produtivos, alinhando-se aos princípios da bioeconomia circular, que promove o uso eficiente de recursos e a redução de desperdícios por meio do reaproveitamento de subprodutos agroindustriais. Entre as alternativas destacadas, o uso em nanomateriais representa uma fronteira tecnológica promissora. A fuligem, rica em carbono amorfo, pode ser convertida em materiais de elevada funcionalidade, como nanotubos de carbono, grafeno ou estruturas hierárquicas, com aplicações em áreas como sensores, dispositivos eletrônicos, catálise e medicina regenerativa (RUSSO; APICELLA; CIAJOLO, 2023). Do ponto de vista ambiental e econômico, essa transformação permite agregar elevado valor a um resíduo antes considerado de baixo aproveitamento.

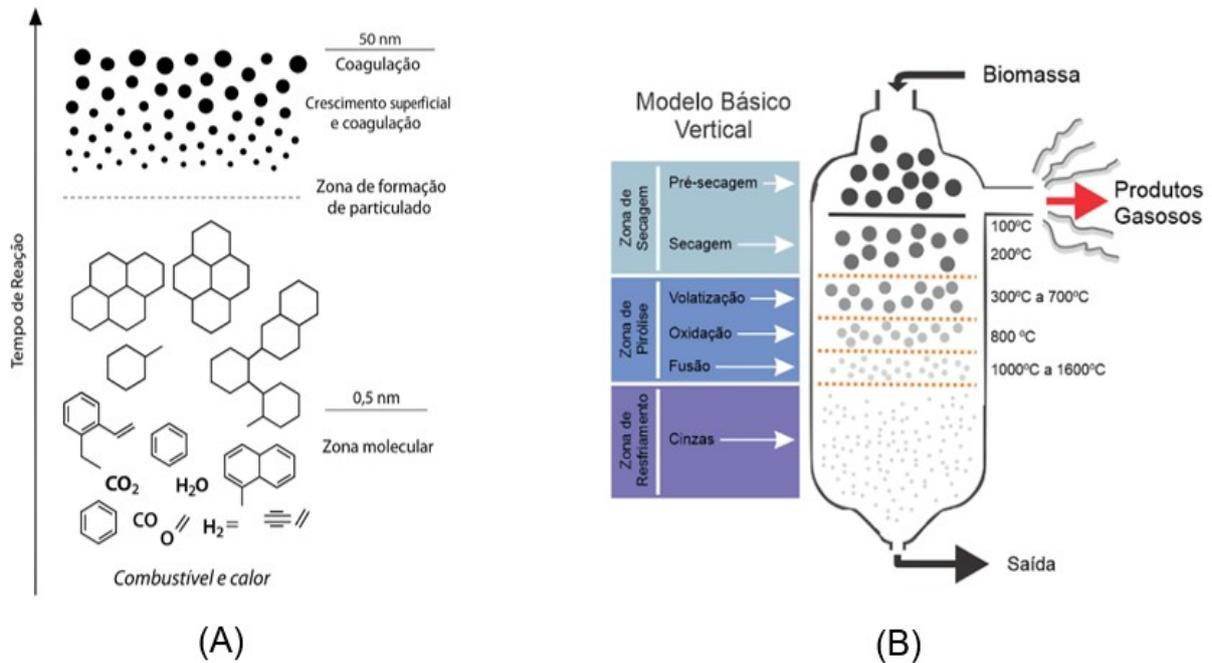


Figura 2. Formação da fuligem (A) e etapas do reator pirolítico (B).
Fonte: Adaptada de INFOESCOLA (2025)

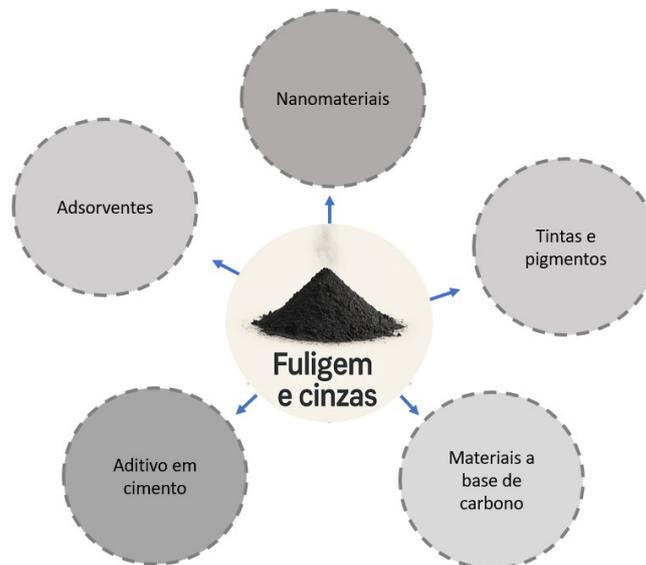


Figura 3. Aproveitamento tecnológico da fuligem e cinzas do bagaço de cana no contexto da bioeconomia.

Outro uso relevante está na produção de adsorventes, especialmente para o tratamento de águas residuais e efluentes industriais. As propriedades texturais das cinzas, quando ativadas, favorecem a adsorção de metais pesados, corantes e compostos orgânicos, promovendo o reaproveitamento em processos de remediação ambiental (NGUYEN et al., 2023). A aplicação como pigmento em tintas também se destaca por sua viabilidade técnica e econômica. O carbono presente na fuligem pode ser utilizado como pigmento preto em formulações de tintas industriais

ou artísticas, substituindo compostos sintéticos mais caros e ambientalmente impactantes (ELKASABI; MULLEN, 2021).

No setor da construção civil, as cinzas podem ser empregadas como aditivos em cimento, atuando como materiais pozolânicos que melhoram a resistência e a durabilidade do concreto. Essa substituição parcial do cimento Portland contribui para a redução das emissões de CO₂ associadas ao setor cimenteiro, promovendo uma construção mais sustentável (ALQARNI, 2022). Por fim, o aproveitamento das cinzas e fuligem na produção

de materiais à base de carbono, como eletrodos, compósitos ou sistemas de armazenamento de energia, amplia as oportunidades de integração entre a indústria sucroenergética e o setor tecnológico, estimulando cadeias produtivas de alto valor agregado (LI, et al., 2022)

Em conjunto, essas aplicações reforçam a relevância da adoção de estratégias circulares, nas quais os resíduos são reinseridos como recursos valiosos em novos ciclos produtivos. A utilização de fuligem e cinzas, portanto, não apenas mitiga impactos ambientais associados ao descarte, mas também fomenta a inovação e a sustentabilidade na agroindústria brasileira, especialmente em contextos regionais onde a cana-de-açúcar representa um dos principais pilares econômicos.

Conclusão

Ao integrar essas rotas de valorização, é possível não apenas mitigar os impactos ambientais da queima da biomassa, como também agregar valor a resíduos antes considerados problemáticos, promovendo a inovação e a sustentabilidade nos sistemas agroindustriais. Essa abordagem fortalece o conceito de biorrefinaria, no qual cada fração da biomassa lignocelulósica é aproveitada de forma racional e eficiente, conforme os princípios da economia circular.

Além disso, a utilização desses subprodutos como insumos industriais contribui diretamente para a redução da dependência de recursos fósseis, apoiando a transição para uma matriz energética mais limpa e resiliente. Nesse cenário, o setor sucroenergético brasileiro, com sua robusta cadeia de produção e inovação, desponta como protagonista na promoção de um modelo de desenvolvimento sustentável baseado no reaproveitamento inteligente da biomassa.

A fuligem e as cinzas oriundas da queima do bagaço de cana-de-açúcar, tradicionalmente tratadas como resíduos industriais de descarte, revelam-se como recursos estratégicos no contexto da bioeconomia circular. A presente revisão evidenciou que, além de seu papel energético na cogeração de eletricidade, o bagaço e seus subprodutos apresentam elevado potencial de aproveitamento tecnológico em diversas aplicações industriais, como a produção de nanomateriais, adsorventes, pigmentos, aditivos para cimento e materiais à base de carbono.

Portanto, fomentar pesquisas sobre a caracterização, funcionalização e aplicação da fuligem e das cinzas do bagaço de cana é fundamental para consolidar tecnologias verdes, impulsionar cadeias de valor e avançar em direção a uma bioeconomia regenerativa e de baixo carbono.

Agradecimentos

Universidade Estadual de Mato Grosso Do Sul; Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais; Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato

Grosso do Sul; Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Código 001.SENAI - Departamento Regional do Mato Grosso do Sul.

Referências

AKPAN, Joseph; OLANREWaju, Oludolapo. Sustainable energy development: History and recent advances. *Energies*, v. 16, n. 20, p. 7049, 2023.

ALQARNI, Ali S. A comprehensive review on properties of sustainable concrete using volcanic pumice powder ash as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, v. 323, p. 126533, 2022.

ALTARAWNEH, Mohammednoor; ALI, Labeeb. Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Thermal Systems: A Comprehensive Mechanistic Review. *Energy & Fuels*, v. 38, n. 22, p. 21735-21792, 2024.

ANDERSON, A. et al. Treatment of heavy metals containing wastewater using biodegradable adsorbents: A review of mechanism and future trends. *Chemosphere*, v. 295, p. 133724, 2022.

ASAAD, Sara Maen et al. Definition of bioenergy. In: *Renewable Energy-Volume 2: Wave, Geothermal, and Bioenergy*. Academic Press, 2024. p. 215-243.

AYACH, Jana et al. Comparing conventional and advanced approaches for heavy metal removal in wastewater treatment: an in-depth review emphasizing filter-based strategies. *Polymers*, v. 16, n. 14, p. 1959, 2024.

BALASUBRAMANIAN, Dhinesh et al. Recent advances and research progress on the role of carbon-based biomass in ultra-capacitors: A systematic review. *Energy Storage*, v. 6, n. 4, p. e646, 2024.

DA SILVA, Ramires Nogueira; DE LIMA, Francisco Espedito. Estudo do impacto do teor de umidade do bagaço de cana-de-açúcar em sistemas de cogeração. *Revista Geama*, v. 6, n. 2, p. 25-33, 2020.

EDO, Greatluoghene et al. Impact of environmental pollution from human activities on water, air quality and climate change. *EcologicalFrontiers*, 2024.

ELKASABI, Yaseen; MULLEN, Charles A. Progresso em carbonos industriais de base biológica como coprodutos termoquímicos de biorrefinarias. *Energia e Combustíveis*, v. 35, n. 7, p. 5627-5642, 2021.

ELWARDANY, Mohamed. Enhancing steam boiler efficiency through comprehensive energy and

- exergy analysis: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Plano decenal de expansão de energia 2026*. Brasília: MME/EPE, 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf>. Acesso em: 3 maio 2025.
- FALKENBERG, Laura J. et al. Ocean acidification and human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 12, p. 4563, 2020.
- FILONCHYK, Mikalai et al. Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O. *Science of The Total Environment*, p. 173359, 2024.
- HASSAN, Qusay et al. The renewable energy role in the global energy Transformations. *Renewable Energy Focus*, v. 48, p. 100545, 2024.
- KABEYI, Moses Jeremiah Barasa; OLANREWAJU, Oludolapo Akanni. Bagasse electricity potential of conventional sugarcane factories. *Journal of Energy*, v. 2023, n. 1, p. 5749122, 2023.
- KABEYI, Moses Jeremiah Barasa; OLANREWAJU, Oludolapo Akanni. Sustainable energy transition for renewable and low carbon grid electricity generation and supply. *Frontiers in Energy research*, v. 9, p. 743114, 2022.
- INFOESCOLA – Pirólise. Disponível em: <https://www.infoescola.com/reacoes-quimicas/pirolis e/>. Acesso em 03 de maio de 2025.
- KALAK, Tomasz. Potential use of industrial biomass waste as a sustainable energy source in the future. *Energies*, v. 16, n. 4, p. 1783, 2023.
- KULSHRESHTHA, Amit et al. Electricity generation in thermal power plants from agriculture residue-based biomass: Techno-economic aspects & contribution in sustainable development goals. *Water and Energy International*, v. 66, n. 7, p. 45-50, 2023.
- LI, Hongqiang et al. Synthesis, modification strategies and applications of coal-based carbon materials. *Fuel Processing Technology*, v. 230, p. 107203, 2022..
- LIU, Huimin et al. Review on the current status of the co-combustion technology of organic solid waste (OSW) and coal in China. *Energy & Fuels*, v. 34, n. 12, p. 15448-15487, 2020.
- LÓPEZ-CÁMARA, Claudia-F. et al. Evolution of particle size and morphology in plasma synthesis of few-layer graphene and soot. *Combustion and Flame*, v. 258, p. 112713, 2023.
- LUO, Zhongyang; ZHOU, Jinsong. Thermal conversion of biomass. In: *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 965-1021.
- MICHELSEN, Hope A. et al. A review of terminology used to describe soot formation and evolution under combustion and pyrolytic conditions. *ACS nano*, v. 14, n. 10, p. 12470-12490, 2020.
- NGUYEN, Hong-Ha T. et al. Emerging waste-to-wealth applications of fly ash for environmental remediation: A review. *Environmental research*, v. 227, p. 115800, 2023.
- NHIEN, Le Cao; VAN DUC LONG, Nguyen; LEE, Moonyong. Novel heat-integrated hybrid distillation and adsorption process for coproduction of cellulosic ethanol, heat, and electricity from actual lignocellulosic fermentation broth. *Energies*, v. 14, n. 12, p. 3377, 2021.
- NOSENZO, Sebastian G. Evaluating Sugarcane Bagasse-Based Biochar as an Economically Viable Catalyst for Agricultural and Environmental Advancement in Brazil through Scenario-Based Economic Modeling. *Journal of Power and Energy Engineering*, v. 12, n. 11, p. 97-124, 2024.
- NUNES, Leonel JR. The rising threat of atmospheric CO₂: a review on the causes, impacts, and mitigation strategies. *Environments*, v. 10, n. 4, p. 66, 2023.
- OJADI, Jessica Obianuju et al. AI-driven predictive analytics for carbon emission reduction in industrial manufacturing: a machine learning approach to sustainable production. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, v. 4, n. 1, p. 948-960, 2023.
- PALACIOS-BERECHE, M. C. et al. Brazilian sugar cane industry—A survey on future improvements in the process energy management. *Energy*, v. 259, p. 124903, 2022.
- PANDIT, Soumya et al. Agricultural waste and wastewater as feedstock for bioelectricity generation using microbial fuel cells: Recent advances. *Fermentation*, v. 7, n. 3, p. 169, 2021.
- POWAR, R. V. et al. End-use applications of sugarcane trash: A comprehensive review. *Sugar Tech*, v. 24, n. 3, p. 699-714, 2022.
- RANI, Gokana Mohana et al. Agro-waste to sustainable energy: A green strategy of converting agricultural waste to nano-enabled energy applications. *Science of The Total Environment*, v. 875, p. 162667, 2023.

ROCHA-MENESES, Lisandra et al. An overview of the socio-economic, technological, and environmental opportunities and challenges for renewable energy generation from residual biomass: a case study of biogas production in Colombia. *Energies*, v. 16, n. 16, p. 5901, 2023.

RUSSO, Carmela; APICELLA, Barbara; CIAJOLO, Anna. Hydrogen, sp² carbon hybridization, and sp² clustering as pieces of the puzzling nanostructure of soot: a closer look. *Energy & Fuels*, v. 37, n. 17, p. 12525-12540, 2023.

SAINI, Deepika et al. Carbon nanomaterials derived from black carbon soot: a review of materials and applications. *ACS Applied Nano Materials*, v. 4, n. 12, p. 12825-12844, 2021.

SANTOS JÚNIOR, Edvaldo Pereira et al. Distribution and Spatial Dependence of Sugar Energy Bioelectricity in the Brazilian Scenario. *Sustainability*, v. 17, n. 8, p. 3326, 2025.

SHARMA, Monika et al. Advances in the biomass valorization in bioelectrochemical systems: A sustainable approach for microbial-aided electricity and hydrogen production. *Chemical Engineering Journal*, v. 465, p. 142546, 2023.

SHOAIB, Muhammad et al. AIR POLLUTION AND CLIMATE CHANGE: A DUAL THREAT TO ECOSYSTEMS AND HUMAN HEALTH. *Journal of Medical & Health Sciences Review*, v. 2, n. 2, 2025.

SRIVASTAVA, Rajesh K. Renewable (Bio-Based) Energy from Natural Resources (Plant Biomass Matters). In: *Introduction to AI Techniques for Renewable Energy System*. CRC Press, 2021. p. 201-214.

SUMATHI, Subith Vasu et al. Gas-to-liquids and other decarbonized energy carriers. In: *Energy Transport Infrastructure for a Decarbonized Economy*. Elsevier, 2025. p. 397-412.

THOMAS, Blessen Skariah et al. Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, v. 40, p. 102332, 2021.

TOLISANO, Ciro; DEL BUONO, Daniele. Biobased: Biostimulants and biogenic nanoparticles enter the

scene. *Science of the Total Environment*, v. 885, p. 163912, 2023.

TOMLIN, Alison S. Air quality and climate impacts of biomass use as an energy source: a review. *Energy & Fuels*, v. 35, n. 18, p. 14213-14240, 2021.

TURSI, Antonio; OLIVITO, Fabrizio. Biomass conversion: general information, chemistry, and processes. In: *Advances in bioenergy and microfluidic applications*. Elsevier, 2021. p. 3-39.

WANI, Atif Khurshid et al. Advances in safe processing of sugarcane and bagasse for the generation of biofuels and bioactive compounds. *Journal of agriculture and food research*, v. 12, p. 100549, 2023.

WEI, Xun et al. From biotechnology to bioeconomy: A review of development dynamics and pathways. *Sustainability*, v. 14, n. 16, p. 10413, 2022.

WITTMANN, Veronika; ARICI, Elif; MEISSNER, Dieter. The nexus of world electricity and global sustainable development. *Energies*, v. 14, n. 18, p. 5843, 2021.

XI, Jianfei et al. A review of recent research results on soot: The formation of a kind of carbon-based material in flames. *Frontiers in Materials*, v. 8, p. 695485, 2021.

YAN, Beibei et al. Application of optical diagnosis technology in biomass combustion. *Biomass and Bioenergy*, v. 184, p. 107198, 2024.

YIN, Zibin et al. A review of the development and application of soot modelling for modern diesel engines and the soot modelling for different fuels. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 178, p. 836-859, 2023.

ZHANG, Ling et al. Indoor particulate matter in urban households: sources, pathways, characteristics, health effects, and exposure mitigation. *International journal of environmental research and public health*, v. 18, n. 21, p. 11055, 2021.

ZHONG, Jian et al. Impacts of net zero policies on air quality in a metropolitan area of the United Kingdom: Towards world health organization air quality guidelines. *Environmental Research*, v. 236, p. 116704, 2023.