

ESTUDOS AVANÇADOS EM CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOMASSA RESIDUAL PARA PROCESSOS DE GASEIFICAÇÃO E NOVOS COMBUSTÍVEIS SINTÉTICOSMariana Crespo Diogo¹ (IC), Diego M. Y. Maia (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá.**Palavras-chave:** Agroindústria. Biomassa residual. Eficiência energética. Gaseificação.**Introdução**

A crescente demanda por fontes de energia renovável impulsiona tecnologias sustentáveis, como a gaseificação de biomassa. Na safra 2022/2023, a produção global de café superou 10,3 milhões de toneladas, com o Brasil respondendo por cerca de 40%. Apenas em Minas Gerais, geram-se mais de 2 milhões de toneladas anuais de resíduos, incluindo cascas e borras.

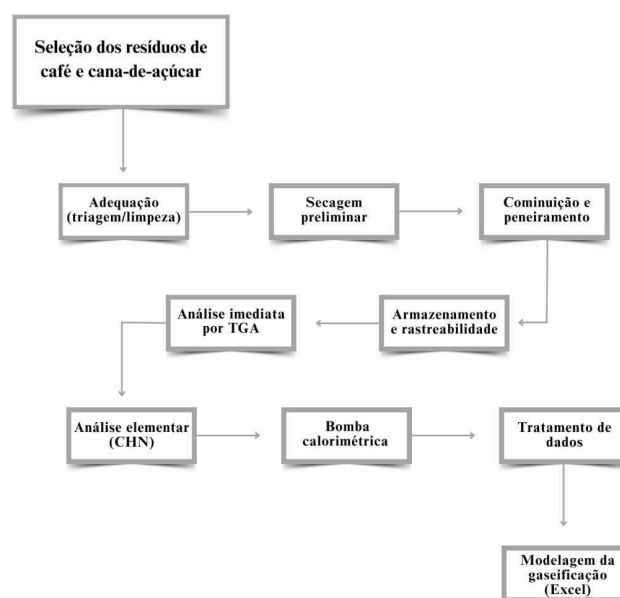
De forma similar, a produção de cana-de-açúcar atingiu 1,9 bilhão de toneladas em 2023, sendo cerca de 35% provenientes do Brasil. A safra brasileira de 2023/2024 foi estimada em 657 milhões de toneladas, principalmente em São Paulo e Triângulo Mineiro, gerando grandes quantidades de resíduos, como bagaço e palha, cujo descarte inadequado representa passivo ambiental.

A conversão termoquímica por gaseificação configura-se como uma alternativa eficiente para o aproveitamento energético de resíduos agrícolas, como café e cana-de-açúcar, promovendo a diversificação da matriz energética, a redução do passivo ambiental e a geração de subprodutos de valor agregado, como o biochar. Esse processo consiste na conversão da biomassa sólida em um gás combustível composto principalmente por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) e metano (CH₄), mediante reação com agentes gaseificantes (ar, vapor ou oxigênio) em altas temperaturas. Neste estudo, utilizou-se o vapor d'água como agente, pois sua reação com o carbono presente nos compostos orgânicos aumenta a produção de H₂ e CO, ampliando as possibilidades de uso do gás gerado na geração de energia, na produção de combustíveis sintéticos e na síntese de hidrogênio verde, alinhando-se às metas de sustentabilidade e transição energética.

Metodologia

A metodologia empregada está representada no diagrama de fluxo apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de Fluxo da Metodologia Utilizada.



Fonte: Autoria Própria (2025)

Os resíduos de café, compostos por cascas e borras, e de cana-de-açúcar, constituídos por bagaço e palha, foram coletados em propriedades agroindustriais, com descarte de amostras contaminadas ou degradadas. Após a coleta, passaram por triagem, limpeza e secagem inicial ao ar, seguida de estabilização em estufa até atingirem massa constante. Em seguida, foram triturados em moinho, peneirados para obtenção de granulometria uniforme e armazenados em frascos herméticos devidamente identificados.

A caracterização imediata foi conduzida por análise termogravimétrica (TGA), em atmosfera de nitrogênio na etapa de pirólise e ar sintético na etapa de oxidação, com aquecimento até 800 °C, possibilitando determinar

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

os teores de umidade, matéria volátil, cinzas e carbono fixo. Complementarmente, foi realizada a análise elementar (CHN), em triplicata, para quantificação de carbono, hidrogênio e nitrogênio, permitindo avaliar o potencial energético dos resíduos. As propriedades energéticas foram obtidas por meio de ensaios em bomba calorimétrica, em triplicata, determinando o poder calorífico superior (PCS). Por fim, a etapa de gaseificação foi simulada em planilha Excel, utilizando balanços de massa e hipóteses reacionais, de modo a estimar as frações molares de H_2 , CO , CO_2 e CH_4 e discutir a viabilidade técnica dos resíduos como insumos energéticos.

Resultados e discussão

Primeiramente, apresenta-se, Tabela 1, os valores obtidos dos teores, em porcentagem, de umidade, matéria volátil, cinzas e o carbono fixo por meio da análise termogravimétrica dos resíduos de café e cana-de-açúcar.

Tabela 1 – Análise Termogravimétrica do Café e da Cana-de-açúcar.

Biomassa	Umidade (%)	Matéria Volátil (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
Café	4,61	77,54	-0,09	17,71
Cana-de-açúcar	6,16	80,21	0,11	13,52

Fonte: Autoria Própria (2025)

Na gaseificação, a baixa umidade é vantajosa, pois o excesso de água exige mais energia para evaporar, reduzindo a eficiência térmica do processo. O baixo teor de umidade observado indica que ambas as biomassas são adequadas, demandando menos energia no pré-tratamento de secagem.

A matéria volátil foi o componente mais abundante nos resíduos. Sua alta concentração é importante, pois esses compostos orgânicos se decompõem facilmente, formando gases de interesse, como o hidrogênio.

O carbono fixo representa o material que permanece após a liberação da matéria volátil. Durante a gaseificação, ele reage com o agente gaseificador (vapor d'água) para gerar mais hidrogênio e monóxido de carbono.

As cinzas, fração inorgânica da biomassa, não participam da gaseificação e podem causar formação de

escória, obstruindo o reator. Um teor de cinzas baixo é, portanto, benéfico, garantindo operação contínua e eficiente do processo.

Em seguida, estão apresentados os valores da análise elementar do café e da cana-de-açúcar nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 – Análise Elementar do Café.

Amostra	C (%)	H (%)	N (%)
1	46,62	6,60	1,09
2	48,35	6,92	1,08
3	48,69	6,50	1,38

Fonte: Autoria Própria (2025)

Tabela 3 – Análise Elementar da Cana-de-açúcar.

Amostra	C (%)	H (%)	N (%)
1	46,32	6,11	0,37
2	46,10	5,68	0,61
3	44,80	6,03	0,43

Fonte: Autoria Própria (2025)

O café apresenta teor de carbono ligeiramente superior ao da cana-de-açúcar, cerca de 47,89% contra 45,74%. Como o carbono é o principal combustível, essa diferença contribui para maior produção de gases combustíveis, como CO , durante a gaseificação.

O hidrogênio também é mais elevado no café ($\approx 6,67\%$) em relação à cana ($\approx 5,94\%$), favorecendo a geração de H_2 , gás de alto valor energético.

A diferença mais expressiva está no nitrogênio, com o café apresentando 1,18% e a cana 0,47%. Embora inerte no gaseificador, o nitrogênio pode diluir o gás, reduzir seu poder calorífico e gerar compostos como NH_3 e HCN , exigindo sistemas de limpeza mais robustos. A cana, com menor teor de nitrogênio, produz gás mais purificado, facilitando o tratamento posterior.

O último experimento, realizado com bomba calorimétrica, apresentou os valores de PCS do café e da cana-de-açúcar, conforme as Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Análise na Bomba Calorimétrica do Café.

Amostra	Massa (g)	PCS (J/g)
---------	-----------	-----------

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

1	0,2349	22688
2	0,3955	21197
3	0,2235	23073

Fonte: Autoria Própria (2025)

Tabela 5 – Análise na Bomba Calorimétrica da Cana-de-açúcar

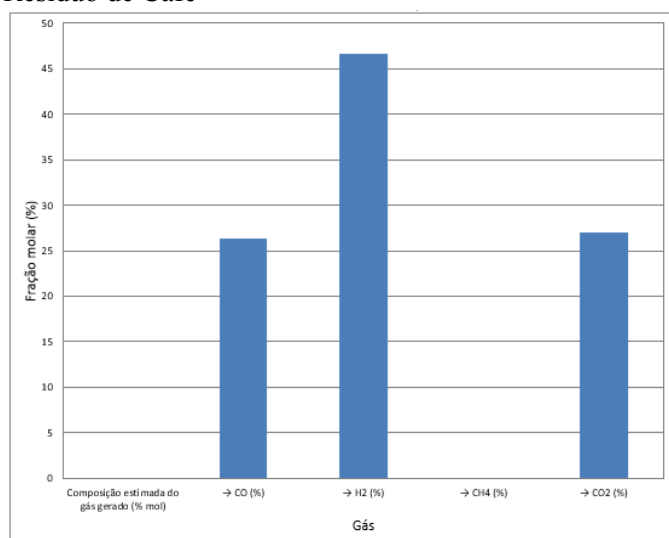
Amostra	Massa (g)	PCS (J/g)
1	0,2498	17490
2	0,3514	17371
3	0,4944	17200

Fonte: Autoria Própria (2025)

O PCS do café é cerca de 28% maior que o da cana-de-açúcar, indicando que o café possui potencial energético significativamente superior por unidade de massa.

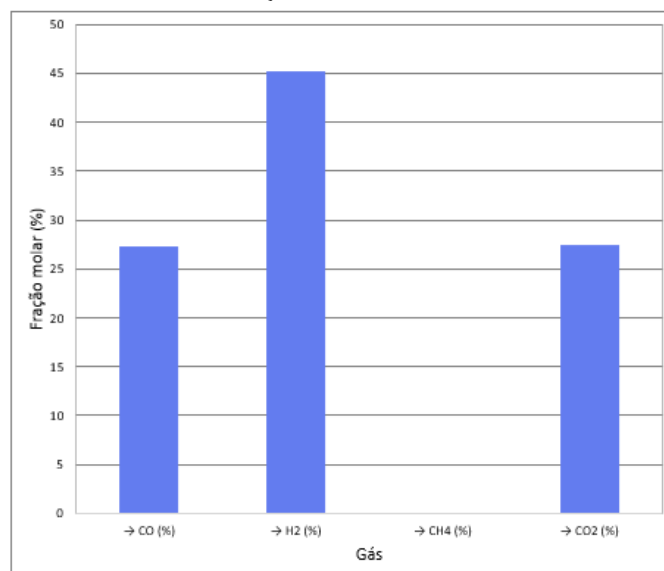
Os gráficos, obtidos com o modelo do Excel, mostram a porcentagem dos gases produzidos na gaseificação (CO, H₂, CH₄ e CO₂), conforme apresentado nas Figuras 2 e 3, para os resíduos de café e cana-de-açúcar, respectivamente.

Figura 2 – Composição Estimada do Gás Para o Resíduo de Café



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 3 – Composição Estimada do Gás Para o Resíduo de Cana-de-açúcar



Fonte: Autoria Própria (2025)

O modelo de gaseificação utilizado considera as reações entre carbono, vapor e oxigênio, fornecendo estimativas da fração molar dos gases produzidos. As Figuras 2 e 3 mostram a composição para café e cana-de-açúcar, com predomínio de H₂ (≈45–48%) e CO (≈23–25%), enquanto o CH₄ é desprezível.

Na gaseificação do café, o H₂ foi o componente mais abundante (≈48%), indicando alto potencial energético, seguido pelo CO (≈25%). O CO₂ apresentou proporção similar, atuando como gás inerte, e o CH₄ permaneceu em concentrações desprezíveis.

A gaseificação da cana-de-açúcar apresentou comportamento semelhante, com H₂ predominante (≈45%) e CO e CO₂ significativos (≈23% e 22–25%), enquanto o CH₄ continuou desprezível. Apesar de o H₂ ser ligeiramente menor que no café, a composição evidencia o elevado potencial energético da cana.

O café apresentou maior teor de carbono (≈47,9%) e hidrogênio (≈6,7%) que a cana (≈45,7% de C e 5,9% de H), refletindo maior produção de H₂ e CO. O café também teve nitrogênio mais elevado (≈1,18%), exigindo atenção a contaminantes gasosos. Comparados a outros resíduos lignocelulósicos, ambos estão na faixa típica, com destaque para o café pelo maior poder calorífico (≈22 MJ/kg contra ≈17 MJ/kg da cana).

Conclusões

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

A gaseificação dos resíduos de café e cana-de-açúcar demonstrou potencial para aproveitamento energético sustentável. O café apresentou maior rendimento energético por massa, devido ao seu teor de carbono e voláteis, enquanto a cana se destaca pela disponibilidade e baixo custo, favorecendo aplicações em larga escala.

O uso de vapor como agente gaseificante mostrou-se eficiente, produzindo gás de elevada qualidade energética e pouco diluído por nitrogênio, ampliando suas aplicações.

O gás gerado pode ser usado para calor e eletricidade, além de servir como insumo para combustíveis sintéticos e, especialmente, como fonte de hidrogênio verde, estratégico para a transição energética.

O estudo reforça a importância da valorização de resíduos agroindustriais, promovendo sustentabilidade e economia circular, com destaque para a produção de hidrogênio verde.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo espaço e infraestrutura que possibilitaram o desenvolvimento desta pesquisa, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento, fundamental para a execução do projeto.

O trabalho contou com apoio do CNPq, por meio do Processo 403582/2021-0, vinculado ao projeto “Valorização energética de biomassa residual para precursores de alto valor energético”, no âmbito da Chamada CNPq/MCTI/FNDCT nº 18/2021 – Faixa A – Grupos de Pesquisa.

Referências

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra 2023/24 – quarto levantamento. Brasília, DF: Conab, 2023.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT: crops and livestock products. Rome: FAO, 2023.

MAPA – Ministério da Agricultura e Pecuária. Anuário estatístico do café 2023. Brasília, DF: MAPA, 2023.

OIC – Organização Internacional do Café. Coffee market report: 2022/23 coffee year. Londres: International Coffee Organization, 2023.

XU, Zaifeng; QI, Huaqing; YAO, Dong; ZHANG, Jifu; ZHU, Zhaoyou; WANG, Yinglong; CUI, Peizhe. Modeling and comprehensive analysis of food waste gasification process for hydrogen production. *Energy Conversion and Management*, v. 258, p. 115509, 2022.

SAJID, Muhammad; RAHEEM, Abdul; ULLAH, Naeem; ASIM, Muhammad; REHMAN, Muhammad Saif Ur; ALI, Nisar. Gasification of municipal solid waste: progress, challenges, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 168, p. 112815, 2022.

AYUB, Yousaf; REN, Jingzheng; SHI, Tao. Exploring gasification process and technology for biomass-waste utilization: a comprehensive review on the path to sustainable energy. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 188, p. 1489-1501, 2024.

SALES, C. A. V. B. de et al. Experimental study on biomass (eucalyptus spp.) gasification in a two-stage downdraft reactor by using mixtures of air, saturated steam and oxygen as gasifying agents. *Energy Conversion and Management*, [S. l.], v. 145, p. 314-323, 1 ago. 2017.