

ESTUDOS AVANÇADOS EM CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOMASSA RESIDUALAna Livia de Souza Benedicto¹ (IC), Diego Mauricio Yepes Maya (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá**Palavras-chave:** Caracterização físico-química. Conversão termoquímica. Poder calorífico.**Introdução**

O Brasil é um país que apresenta elevada produção de biomassa, com grande potencial de aproveitamento energético. A biomassa, definida como qualquer matéria orgânica passível de conversão em energia térmica, mecânica ou elétrica, tem sido utilizada desde os primórdios da civilização e, mais recentemente, consolidou-se como alternativa estratégica para a diversificação da matriz energética mundial, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis. Nesse contexto, a utilização de resíduos agroindustriais ganha destaque, sobretudo em países de perfil agrícola como o Brasil, onde a disponibilidade de subprodutos é expressiva.

Entre as culturas de maior relevância, destaca-se o milho, cuja área plantada no país aumentou 74,6% nos últimos 20 anos, passando de 12,8 milhões de hectares em 2003 para 22,3 milhões em 2023 (Conab). Uma lavoura de milho pode gerar entre 6 e 12 t ha⁻¹ de resíduos vegetais, sendo que áreas mais produtivas tendem a disponibilizar ainda maiores volumes. Esses resíduos lignocelulósicos, como folhas, palha e sabugo, são ricos em celulose e hemicelulose, características que os tornam matérias-primas promissoras para a produção de biocombustíveis e insumos energéticos.

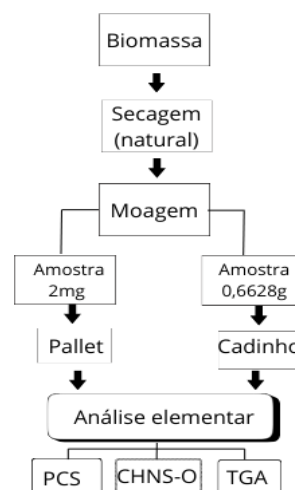
Apesar do grande potencial, boa parte desses resíduos ainda é subutilizada ou descartada no campo. Assim, compreender a composição físico-química da biomassa residual do milho é fundamental para identificar rotas de valorização mais eficientes, incluindo a conversão termoquímica em produtos de maior valor agregado, como biocarvão, bio-óleo e gás de síntese. Dessa forma, este trabalho insere-se no projeto CNPq (Processo: PVDI231-2022), intitulado *Valorização energética de biomassa residual para precursores de alto valor energético*, e tem como objetivo caracterizar a biomassa residual do milho, fornecendo subsídios técnicos para o aproveitamento sustentável dessa fonte e a consolidação de uma matriz energética mais limpa no país.

Metodologia

Durante o desenvolvimento da pesquisa, os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização de

Combustíveis (LCC/NEST), integrante do Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída. Ao longo do ano, diferentes biomassas residuais foram caracterizadas, provenientes de diferentes cadeias produtivas e fontes de descarte, incluindo bagaço de cana, resíduos de café, cacau, além de outros resíduos variados. Contudo, esse reporte concentrou-se na caracterização da biomassa do milho, abrangendo resíduos como palha e o sabugo, obtidos a partir de descartes.

A sequência das metodologias que foram aplicadas nesse trabalho pode ser visualizada na figura 1

Figura 1 – Sequência Metodológica

Fonte: Autor próprio

Os resíduos do milho foram obtidos em uma propriedade rural na cidade de Pedralva - MG. Inicialmente, as amostras foram submetidas à secagem ao ar, a fim de reduzir a umidade, e, posteriormente, processadas em um micromoinho (Figura 2), garantindo granulometria ideal para dar início às análises.

Figura 2: Etapas de moagem da biomassa de milho em micromoinho

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



Fonte: Autor próprio

Para a caracterização das biomassas, foram utilizados vários equipamentos analíticos contidos no laboratório de estudo. As informações termogravimétricas, referentes à instabilidade térmica e à perda de massa, normalmente obtidas com o analisador TGA 701 da LECO, foram extraídas de dados disponíveis na literatura, uma vez que a análise não pôde ser executada no presente trabalho. O analisador elementar CHNS-O 2400 Series II, da Perkin Elmer, foi utilizado para determinar teores em porcentagem de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S) e oxigênio (O), elementos que influenciam diretamente no comportamento de combustão das amostras. Além disso, a bomba calorimétrica C-200, da IKA, foi utilizada para medir a energia liberada por unidade de massa durante o processo de combustão. As análises foram executadas conforme procedimentos estabelecidos por normas internacionais, a fim de assegurar a padronização dos resultados. A composição elementar foi obtida de acordo com a ASTM D5373 (ASTM, 2021). Já a avaliação do poder calorífico superior foi conduzida conforme as diretrizes da ASTM D5865 (ASTM, 2019).

A análise imediata possibilita determinar os teores de umidade (U), matéria volátil (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) presentes na amostra. Conforme a metodologia descrita por Idelbrando (2021), os ensaios foram conduzidos em um forno mufla, utilizando aproximadamente 1,0 g de biomassa. O teor de umidade foi obtido por meio da secagem em cadinho de cerâmica a 105 °C, até atingir a massa constante. Em seguida, a matéria volátil (base seca) foi determinada aquecendo-se a amostra a 900 °C por 7 minutos, em cadinho tampado. O teor de cinzas, por sua vez, foi dado após a queima da biomassa a 550 °C, e o carbono fixo foi calculado por diferença.

Resultados e discussão

A análise imediata da biomassa residual da colheita do milho, reportada por Idelbrando (2021) e apresentada na Tabela 1, evidência resultados semelhantes aos observados em outros estudos.

Referência	Biomassa	U%	MV% (b.s.)	CF% (b.s.)	CZ% (b.s.)
Idelbrando (2021)	RM	5,72	78,93	18,53	2,54
Aboyade et al. (2011)	Sabugo	6,50	80,20	16,70	3,10
Demirbas (1997)	Palha	12,1	78,70	17,60	3,70

Fonte: Cenci (2022).

Para a análise elementar foi estudada uma biomassa conjunta, um blend da palha e do sabugo do milho. Os dados encontrados da análise elementar dos resíduos do milho (RM) estão dispostos na Tabela 2. As porcentagens encontradas de cada biomassa se relacionam com a quantidade de energia liberada na quebra das ligações químicas desses elementos (DORNELES, 2021).

Tabela 2– Dados da análise elementar dos resíduos do milho (RM), em comparação com a literatura

Referência	Biomassa	C%	H%	N%	O%
Autoria própria	Blend RM	49,53	6,6	0,43	43,44
CBSP (2019)	Blend RM	45,77	6,02	0,93	47,22
Kumar et al. (2008)	Palha	47,40	5,01	0,77	38,09
Cunha (2020)	Sabugo	42,08	5,55	1,19	49,55

Fonte: Autor próprio.

Os resultados obtidos na análise elementar apresentaram alto teor de carbono (49,53%), surgindo uma grande proporção de ligações C–C de alta energia, associado a um alto poder calorífico (ALVES et al., 2020). O RM também apresentou teores relevantes de H, N e S, aproximando-se de outras biomassas para fins energéticos reportadas na literatura. O baixo teor de enxofre é considerado um parâmetro desejável em aplicações de combustão voltadas à geração de energia térmica limpa, contribuindo para a redução de gases poluentes do tipo SO_x e, consequentemente, de custos associados ao seu controle (ALVES et al., 2020).

Portanto, optou-se por não incluí-los, uma vez que tanto os valores obtidos quanto os reportados na literatura apresentam magnitudes muito próximas de zero.

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

De acordo com CENCI (2022), apesar de seu potencial como combustível, a biomassa apresenta teor elevado de oxigênio em relação aos combustíveis fósseis, o que pode comprometer o poder calorífico e a eficiência na conversão térmica.

O Poder Calorífico Superior (PCS) do RM, determinado por meio da bomba calorimétrica, está apresentado na Tabela 3 para comparação com valores já reportados na literatura. A média das triplicatas realizadas em laboratório resultou em 16,125 MJ/kg. Esse valor, obtido para os blends do RM, mostra proximidade com os registrados por Santos e Ohara (16,12 MJ/kg) e Cenci (16,08 MJ/kg) em estudos com palha de milho e os blends, mas apresenta certa diferença em relação ao PCS encontrado por Silva e Ataíde (19,28) para o sabugo de milho.

Tabela 3 – Valor do PCS por bomba calorimétrica para o RM em comparação com a literatura

Referência	Biomassa	PCS(MJ/kg)
Autoria Própria (2025)	RM	16,125
Cenci (2022)	RM	16,08
Santos e Ohara (2016)	Palha	16,12
Silva e Ataíde (2019)	Sabugo	19,28

Fonte: Autor próprio

A partir do Poder Calorífico Superior (PCS) do RM, determinado em 16,125 MJ/kg, é possível estimar a disponibilidade energética dos resíduos de milho considerando a produção por hectare e a área cultivada. A energia disponível pode ser calculada pela seguinte equação:

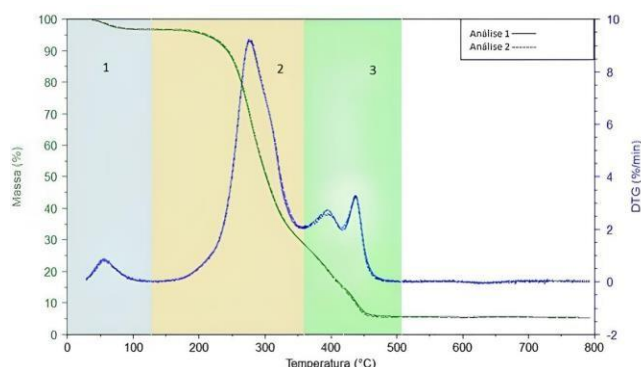
$$E(\text{total}) = \text{PCS} \times M \quad (1)$$

Considerando uma produção de resíduos vegetais de milho entre 6 e 12 t/ha (6.000 a 12.000 kg/ha) e a área plantada de 22,3 milhões de hectares, conforme dados apresentados na introdução, a energia disponível por hectare varia de aproximadamente 96.750 a 193.500 MJ/ha. Estendendo esses valores à produção nacional, a disponibilidade energética total dos resíduos do milho situar-se-ia entre $2,16 \times 10^{12}$ e $4,31 \times 10^{12}$ MJ, evidenciando o elevado potencial do RM como fonte de bioenergia.

Também utilizou-se o ensaio termogravimétrico descrito por Cenci (2022), realizado em atmosfera oxidante (ar sintético). As curvas de TG e DTG apresentaram comportamentos muito semelhantes nos dois testes reportados, motivo pelo qual o autor considerou apenas

a análise 1 para interpretação dos resultados, representada na Figura 3.

Figura 3 – Comportamento da decomposição mássica do RM em função da temperatura



Fonte: Cenci (2022)

Segundo Cenci (2022), a análise termogravimétrica do RM em atmosfera oxidante apresentou quatro etapas principais. O primeiro pico esteve associado à perda de umidade residual, indicando comportamento levemente higroscópico da biomassa. O segundo pico correspondeu à pirólise oxidativa, com predominância da decomposição de hemicelulose, responsável pela maior taxa de perda de massa. O terceiro pico esteve relacionado à degradação da celulose, enquanto o quarto pico se associou à oxidação da lignina, que ocorre de forma mais lenta devido à sua elevada estabilidade térmica. Após aproximadamente 500 °C, observou-se a estabilização da curva, restando apenas a fração inorgânica (cinzas).

Conclusões

Com base nos objetivos do projeto e nos resultados obtidos na caracterização de biomassas residuais, foi possível avaliar a viabilidade do uso desses materiais como precursores de energia limpa e sustentável.

A análise elementar e imediata mostrou que o RM apresenta baixa umidade (5,72%) e um valor adequado de CF (18,53%), alto teor de carbono (49,53%) e baixos teores de enxofre (0%) e nitrogênio (0,43%), indicando que este resíduo tem bom potencial energético e baixo impacto ambiental em processos de combustão. Esses valores estão em concordância com dados de outras biomassas encontrados na literatura, reforçando a aplicabilidade do RM em processos termoquímicos. O Poder Calorífico Superior (PCS) do RM, determinado pela bomba calorimétrica, apresentou-se em 16,125 MJ/kg, valor satisfatório para caracterizar o RM como uma biomassa com bom desempenho energético.

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

Combinando os resultados de composição química e térmica, pode-se concluir que o RM se mostra adequado para geração de energia térmica limpa, com baixo risco de emissão de poluentes e boa eficiência de conversão. Já ensaios termogravimétricos permitiram identificar os principais estágios de decomposição da biomassa lignocelulósica: inicialmente ocorre a secagem e liberação de umidade, seguida pela pirólise oxidativa, relacionada principalmente à decomposição da hemicelulose, e, por fim, a combustão da celulose e da lignina. As curvas de TG/DTG mostraram uma taxa máxima de decomposição de 9,19%/min em 275,54 °C, evidenciando que a hemicelulose é o componente que mais contribui para a perda de massa nesta etapa. Esses resultados indicam que o aproveitamento de RM em processos termoquímicos pode ser uma alternativa promissora para valorização de resíduos agrícolas, contribuindo para a sustentabilidade energética e redução do impacto ambiental associado à disposição inadequada da biomassa.

Agradecimentos

Agradeço a Universidade Federal de Itajubá, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), No Processo 403582/2021-0 – Projeto: “Valorização energética de biomassa residual para precursores de alto valor energético” - Ação: Chamada CNPq/MCTI/FNDCT No 18/2021 - Faixa A - Grupos Emergentes, ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC CNPq – UNIFEL, Projeto PVDI231-2022.

Referências

ABOYADE, A. O. et al. Non-isothermal kinetic analysis of the devolatilization of corn cobs and sugar cane bagasse in an inert atmosphere. *Thermochimica Acta*, v. 517, n. 1-2, p. 81–89, 2011.

ALVES, J. L. F. et al. Demonstrating the suitability of tamarind residues to bioenergy exploitation via combustion through physicochemical properties, performance indexes, and emission characteristics. **BioEnergy Research**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D5865: Standard Test Method For Gross Calorific Value Of Coal And Coke**. United States: ASTM International, 2019.

CENCI, Giovana Baptista. **Avaliação da combustão de um resíduo da colheita do milho e obtenção do poder calorífico por diferentes metodologias**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Séries históricas de área plantada de milho no Brasil. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>.

CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS – CBSP , XXXIX., 2019, Belém-Pará.

CUNHA, I. F. **Análise térmica e pirólise analítica de sabugo de milho**. 2020. 51 f. Dissertação: (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

DEMIRBAS, A. Calculation of higher heating values of biomass fuels. **Fuel**, v. 76, n. 5, p. 431-434, 1997. Termoquímico. Salão Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão da Uergs (SIEPEX), v. 1, n. 10, 2021.

IDELBRANDO, A. B. **Pirólise não isotérmica de resíduo da colheita do milho por termogravimetria: caracterização e estudo cinético utilizando modelos isoconversionais integrais**. 2021. 56 f. Dissertação: (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

KUMAR, A. et al. **Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock**. *Biomass and bioenergy*, v. 32, n. 5, p. 460–467, 2008.

SANTOS, M. P. O.; OHARA, M. A. **Estudo cinético da pirólise da biomassa palha de milho verde**. 2016. 60 f. Dissertação: (Bacharel em Engenharia de Alimentos).- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

SILVA, A. C. R.; ATAÍDE, C. H. Caracterização do sabugo de milho e composição do bio-óleo produzido no processo de pirólise rápida em reator de leito fluidizado borbulhante. **XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS ENEMP 2019**, Belém, 2019.

