

AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DA PIRÓLISE A VACUO DA PALHA DO CAFÉ EM LEITO FIXO.

Autores: Bruno Fonseca Coelho, Hérika Fontes de Almeida, Edilton Nunes da Silva, Vitória Imbassay, Paula Gomes Siqueira, Robson Costa de Sousa, Josinaldo de Oliveira Dias¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo /Centro de ciências Agrárias e Engenharias- Alegre-ES, Brasil. brufon2323@gmail.com, herika.almeida@edu.ufes.br, nunesedilton@gmail.com, vcamosimbassay@gmail.com, paulasiqueira1810@gmail.com, robson.sousa@ufes.br, josinaldo.dias@ufes.br

Resumo

Este estudo avaliou a pirólise a vácuo da palha de café em reator de leito fixo a 450 °C (60 min), investigando o efeito da taxa de aquecimento (3, 5 e 7 °C·min⁻¹) nos rendimentos dos produtos. A biomassa apresentou perfil lignocelulósico com voláteis de 83,15%, cinzas de 7,71%, carbono fixo de 9,14% e umidade de 12%. A análise elementar indicou C = 43,60%, H = 6,00%, N = 1,86% e O = 40,83%, com H/C = 1,65 e O/C = 0,70, sugerindo predisposição à formação de frações líquidas sob aquecimento moderado. Os rendimentos mostraram predominância do bio-óleo em todas as condições, com máximo em 5 °C·min⁻¹: óleo 38,03 ± 0,007%, carvão 30,27 ± 0,067% e gases 31,69 ± 0,060%. Qualitativamente, o vácuo e a taxa intermediária reduziram reações secundárias e favoreceram a devolatilização, elevando o rendimento líquido e minimizando o carvão. Os resultados indicam que a taxa de 5 °C·min⁻¹ é mais favorável para maximizar bio-óleo em palha de café, reforçando o potencial da rota para valorização desse resíduo no contexto da bioeconomia circular.

Palavras-chave: processo termoquímico; resíduo lignocelulósicos; pirólise a vácuo.

Área do Conhecimento: Engenharias; Engenharia Química

Introdução

A pirólise é um processo termoquímico que decompõe materiais lignocelulósicos em atmosfera inerte ou sob vácuo, gerando três frações: líquidos condensáveis (bio-óleo), sólidos carbonáceos (carvão) e gases não condensáveis. A distribuição desses produtos depende dos parâmetros operacionais como: temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência e pressão, os quais modulam tanto os rendimentos quanto a qualidade das frações obtidas (Carrier et al., 2011; Chen et al., 2017; Ballesteros; Teixeira; Mussatto, 2014).

Entre as rotas disponíveis, a pirólise a vácuo ocorre sob pressão reduzida, encurtando o tempo de residência dos vapores e diminuindo a pressão parcial dos produtos. Esse regime operacional tende a mitigar reações secundárias, resultando em bio-óleos com menor teor de água em comparação à pirólise lenta à pressão atmosférica (Carrier et al., 2011; Fan et al., 2014). Estudos indicam que a faixa de 400–500 °C e taxas de aquecimento entre 15–24 °C·min⁻¹ são condições favoráveis para o rendimento de bio-óleo na pirólise a vácuo, enquanto a pirólise lenta aumenta o rendimento de carvão (Carrier et al., 2011).

A taxa de aquecimento, em particular, exerce influência significativa sobre a conversão da biomassa. Taxas mais elevadas tendem a aumentar a fração líquida ao acelerar a devolatilização e reduzir a permanência dos vapores na matriz, ao passo que taxas muito baixas favorecem reações secundárias e reduzem o rendimento de bio-óleo (Carrier et al., 2011). Além disso, delineamentos experimentais para pirólise a vácuo em leito fixo mostram que temperatura e taxa de aquecimento atuam de forma combinada na otimização dos rendimentos (Fan et al., 2014). Influências semelhantes também foram observadas em matrizes não lignocelulósicas, reforçando a relevância metodológica desse parâmetro (Parku et al., 2020).

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Sob a ótica da economia circular, a pirólise se destaca como estratégia para valorização de coprodutos do café, convertendo resíduos agroindustriais em insumos energéticos e químicos (Chaiyaso et al., 2025; Czarniecka-Skubina et al., 2021). gerada principalmente durante as etapas de secagem e beneficiamento, constitui uma biomassa lignocelulósica seca, com elevado valor energético e composição adequada à conversão termoquímica. apresenta alta proporção de sólidos solúveis, elevada fração volátil e conteúdo mineral relevante, características que a tornam um insumo promissor para a pirólise (Fernandes et al., 2024).

Esse contexto assume particular importância no estado do Espírito Santo, pois o estado concentra a maior parte da produção brasileira de café Conilon. A ampla capilaridade produtiva regional implica geração descentralizada de resíduos como a palha de café, reforçando a necessidade de soluções locais para sua valorização (Fernandes et al., 2024)..

Diante desse cenário, este estudo investiga, em reator de leito fixo sob vácuo, a influência da taxa de aquecimento nos rendimentos de bio-óleo, biocarvão e biogás obtidos na pirólise da palha de café do contexto capixaba, contribuindo com evidências para o dimensionamento de processos coerentes com a bioeconomia circular regional.

Metodologia

Foram aproveitados resíduos provenientes do beneficiamento do café. A palha de café foi fornecida por produtores de café do município de Jerônimo, na região Sul do estado do Espírito Santo.

Para caracterizar a biomassa, foram realizadas análises imediatas (teor de umidade, cinzas, material volátil, e carbono fixo). O teor de umidade foi avaliado segundo a norma ASTM E871-82 (ASTM, 2019), pelo método gravimétrico (base seca). O teor de cinzas foi realizado de acordo com a norma ASTM E1755-01 (ASTM, 2020), por meio da incineração de amostras secas a $575 \pm 25^\circ\text{C}$ em mufla por no mínimo 3 horas. O material volátil: foi determinada conforme a norma ASTM E872-82 (ASTM, 2013), pela perda de massa após aquecimento da amostra, previamente seca, a $950 \pm 20^\circ\text{C}$ por 7 minutos em cadinho coberto, dentro de forno mufla. O teor de carbono fixo foi calculado indiretamente, conforme preconiza a norma ASTM E870-82 (ASTM, 2006), como a diferença percentual entre 100% e a soma dos teores de umidade, voláteis e cinzas, todos expressos na mesma base (base seca).

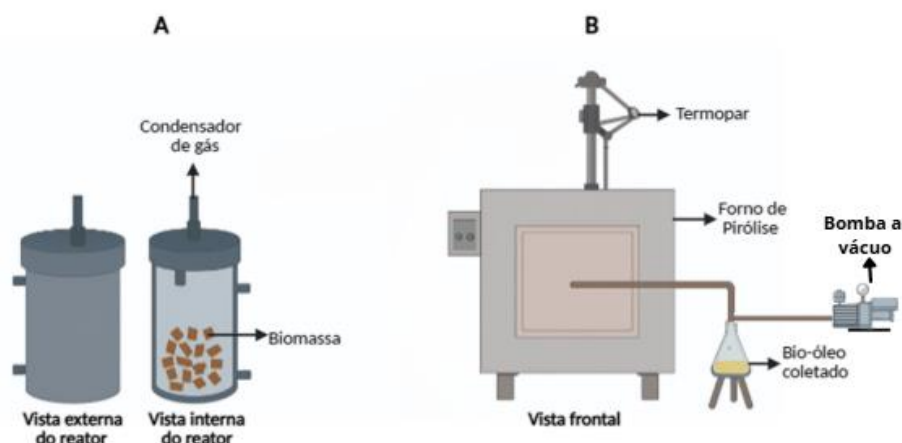
Para análise elementar foram analisados o carbono(C), hidrogênio(H) e nitrogênio(N), pelo método de combustão, em um analisador elementar CHN PerkinElmer 2400 Série II. O oxigênio (O) foi determinado pelo cálculo da diferença conforme a Equação 1

$$O = 100 - C - H - N - \text{Cinzas} \quad (1)$$

Para o processo de pirólise a vácuo, foram pesados aproximadamente 300 ± 10 g do resíduo de palha de café, estes foram transferidos para um reator de leito fixo retangular, alocado dentro de um forno mufla da marca Fortelab, em atmosfera a vácuo conforme ilustrado na Figura 1. O forno foi aquecido até uma temperatura final de 450°C onde foi mantida nesta temperatura por 60 min. Para examinar o impacto do aquecimento no rendimento dos produtos a taxas de aquecimento variou entre $3, 5$ e 7°C min^{-1} . Essas taxas foram selecionadas para simular com mais precisão as condições industriais, aumentando assim a relevância e aplicabilidade de nossas descobertas aos processos industriais. O controle de temperatura foi monitorado com auxílio de um controlador programável Contemp (C704), juntamente com termopares distribuídos por todo o reator para garantir condições de temperatura precisas e consistentes. Os produtos condensáveis (bio-óleo) foram recuperados por um balão de fundo redondo acoplado a uma série de condensadores resfriado com água a 12°C .

Figura 1. Ilustração do sistema de Pirólise. A) reator e B) forno mufla e sistema de condensação de bio-óleo.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO



Fonte: Próprio Autor.

Os rendimentos gravimétricos de carvão (RCV), líquido (RLP) e gases não condensáveis (RGNC), foram determinados pelas Equações 2, 3 e 4, respectivamente.

$$RCV = \left(\frac{M_{cv}}{M_m} \right) * 100 \quad (2)$$

$$RLP = \left(\frac{M_{lp}}{M_m} \right) * 100 \quad (3)$$

$$RGNC = 100 - (RCV + RLP) \quad (4)$$

Em que: RCV = rendimento em carvão vegetal (%); M_{cv} = massa do carvão vegetal (g); M_m = massa seca da palha de café (g); RLP = rendimento em líquido pirolenhoso (bio-óleo) (%); M_{lp} = massa do líquido pirolenhoso (g); RGNC = rendimento em gases não-condensáveis (%).

Resultados

Os resultados quantitativos das análises imediatas e a análise elementar são expressas no quadro 1 e 2.

Quadro 01: Resultado quantitativo da análise imediata da palha de café.

Umidade (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)	Material volátil (%)
12	7,71	9,14	83,15

Fonte: O próprio autor

Quadro 02: Resultado quantitativo da análise elementar da palha de café.

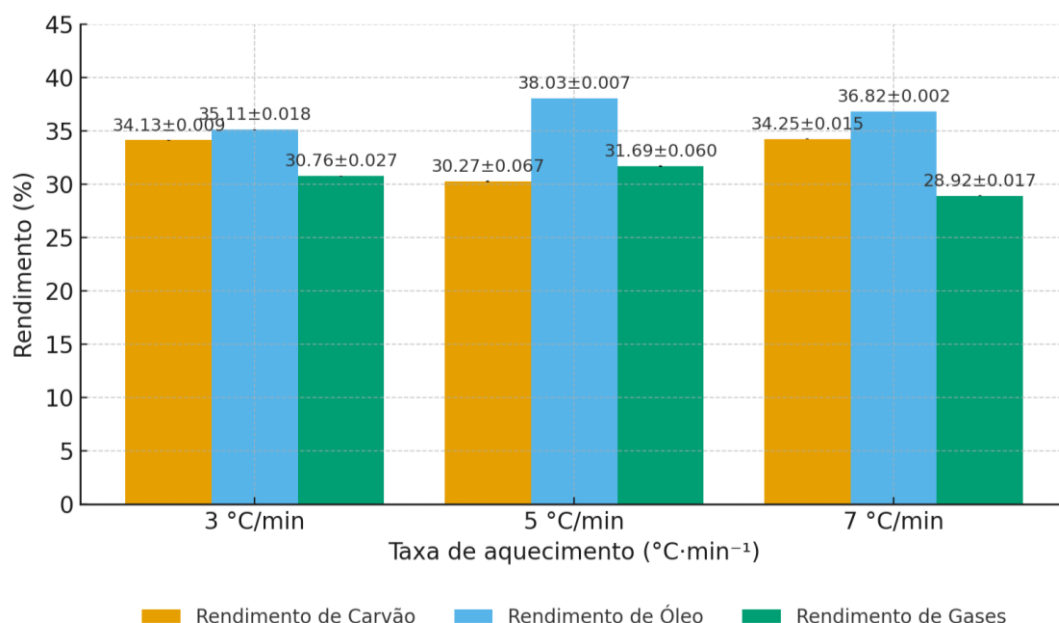
C	H	N	O ²	H/C	O/C
43,60	6,0	1,86	40,83	1,65	0,7

Fonte: O próprio autor

A Figura 02 apresentam o resultado quantitativo do rendimento das frações dos produtos da pirólise a vácuo.

Figura 2: Gráfico de rendimento dos produtos da pirólise a vácuo a 450°C em leito fixo.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO



Fonte: O próprio autor

Discussão

Como apresentado no Quadro 1 a análise imediata da palha de café evidencia um perfil lignocelulósico com alto teor de voláteis de 83,15% e cinzas moderadas de 7,7%, compatível com resíduos agrícolas ricos em hemicelulose e celulose. Para referência, o resíduo industrial de café (CIR) apresenta, em condições análogas, cinzas próximas de 7% e voláteis em torno de 65%, valores úteis para balizar comparações entre matrizes (Chen et al., 2017). Do ponto de vista operacional, a umidade de 12% justifica secagem prévia a fim de reduzir a água no condensado e de favorecer a transferência de calor durante a pirólise, para beneficiar o rendimento líquido elevado (Carrier et al., 2011).

Quanto à análise elementar, os intervalos típicos para biomassas agrícolas situam-se em C entre 40–49% e H entre 6–7%, com alta oxigenação (Huang et al., 2016). No diagrama de Van Krevelen, faixas usuais de H/C e de 1,58–1,74 e O/C entre 0,66–1,00 caracterizam matérias-primas lignocelulósicas (Huang et al., 2016). Assim, O/C = 0,70 e H/C = 1,65 obtidos neste estudo se enquadram nesse domínio, que contribui para a formação de frações condensáveis ricas em oxigenados (ácidos, fenóis e furanos) e um biocarvão de baixo grau de aromatização inicial.

Em pirólise a vácuo, a baixa pressão parcial e o curto tempo de residência dos vapores aceleram a remoção dos produtos primários e limitam reações secundárias que aumentariam o rendimento de carvão. Para diferentes biomassas, janelas típicas de 400–500 °C com taxas de aquecimento moderadas-altas maximizam a fração líquida e reduzem a água no bio-óleo em relação à lenta atmosférica (Carrier et al., 2011). No caso específico do CIR, estudos em reator a vácuo identificam condições ótimas próximas de 400 °C e 30 kPa(abs), com incremento de rendimento de bio-óleo à medida que a pressão diminui (Chen et al., 2017).

Pela Figura 2 é possível observar que o rendimento de óleo foi maior para todas as condições testadas, tendo o maior rendimento na taxa de aquecimento de 5 °C·min⁻¹ com rendimento de 38%, com valores ligeiramente menores para as taxas de 3 e 7 °C·min⁻¹ com 35% e 36% de rendimento respectivamente. O biocarvão atingiu menor rendimento em 5 °C·min⁻¹ rendendo 31%, já para as outras duas condições não houve variação considerável. Enquanto nos gases é possível observar que para a taxa de 7 °C min⁻¹ o rendimento de gás foi o menor permanecendo em 29%, o que pode indicar que o aquecimento muito rápido pode reduzir a produção de gases leves, favorecendo a formação de líquidos. Esse comportamento é coerente com a literatura para vácuo, em taxas muito baixas, o maior tempo efetivo de contato vapor-sólido favorece reações secundárias no leito, em taxas muito altas, gradientes térmicos e craqueamento heterogêneo podem reduzir a fração condensável. Estudos com

palha de colza também apontam melhor rendimento de bio-óleo em taxas intermediárias sob vácuo (Fan et al., 2014), enquanto trabalhos comparativos em bagaço de cana indicam janelas de 400–500 °C e 15–24 °C·min⁻¹ como região promissora para maximizar bio-óleo (Carrier et al., 2011).

Conclusão

A pirólise a vácuo da palha de café em leito fixo a 450 °C mostrou-se tecnicamente viável e alinhada à valorização desse resíduo agroindustrial. A biomassa apresentou perfil favorável à conversão o que se refletiu em rendimentos líquidos predominantes sob vácuo. Entre as taxas avaliadas, pirólise da casca de café produz rendimentos relativamente equilibrados entre carvão, óleo e gases, mas com predomínio do bio-óleo, principalmente em taxa intermediária (5 °C·min⁻¹). Assim, esse parâmetro operacional pode ser ajustado para maximizar o bio-óleo. Esses resultados indicam que a combinação de vácuo com taxa de aquecimento intermediária favorece a devolatilização e limita reações secundárias, potencializando o rendimento de bio-óleo.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E871-82: Standard test method for moisture analysis of particulate wood fuels. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.

_____. ASTM E1755-01: Standard test method for ash in biomass. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

_____. ASTM E872-82: Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.

_____. ASTM E870-82: Standard test methods for analysis of wood fuels. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2006.

_____. ASTM D1200-10: Standard test method for viscosity by Ford viscosity cup. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010.

BALLESTEROS, Lina F.; TEIXEIRA, José A.; MUSSATTO, Solange I. Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin. Food and Bioprocess Technology, v. 7, n. 12, p. 3493–3503, 1 dez. 2014.

CARRIER, Marion et al. Comparison of slow and vacuum pyrolysis of sugar cane bagasse. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 90, n. 1, p. 18–26, 2011.

CHAIYASO, Thanongsak et al. Valorization of Coffee Silverskin via Integrated Biorefinery for the Production of Bioactive Peptides and Xylooligosaccharides: Functional and Prebiotic Properties. Foods, v. 14, n. 15, 1 ago. 2025.

CHEN, Nanwei et al. Study on vacuum pyrolysis of coffee industrial residue for bio-oil production. 18 abr. 2017, [S.l.]: Institute of Physics Publishing, 18 abr. 2017.

FAN, Yongsheng et al. Rape straw as a source of bio-oil via vacuum pyrolysis: Optimization of bio-oil yield using orthogonal design method and characterization of bio-oil. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 106, p. 63–70, 2014.

FERNANDES, Rafael et al. Conilon coffee: A critical review and bibliometric analysis for the agri-food industry. Food Research International. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 1 dez. 2024

GEBREEYESSUS, Getachew Dagnew. Towards the sustainable and circular bioeconomy: Insights on spent coffee grounds valorization. Science of the Total Environment. [S.l.]: Elsevier B.V. , 10 ago. 2022

*A Ciência do **NANO** e seu impacto transformador no **MACRO***

HUANG, Yu Fong et al. Microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass: Heating performance and reaction kinetics. *Energy*, v. 100, p. 137–144, 1 abr. 2016.

PARKU, George Kofi; COLLARD, François Xavier; GÖRGENS, Johann F. Pyrolysis of waste polypropylene plastics for energy recovery: Influence of heating rate and vacuum conditions on composition of fuel product. *Fuel Processing Technology*, v. 209, 1 dez. 2020.