

Desenvolvimento de reator para pirólise assistida por micro-ondas

Alisson Lara de Carvalho¹; Thiago de Paula Protásio¹; Tiago José Pires de Oliveira²

¹ Departamento de Ciências Florestais (DCF), Universidade Federal do Lavras (UFLA), Lavras/MG, Brasil; ² Departamento de Engenharia (DEG), Universidade Federal do Lavras (UFLA), Lavras/MG, Brasil – alisson.carvalho1@estudant.ufla.edu.br

Resumo: A pirólise assistida por micro-ondas (PAM) se destaca por melhorar a qualidade dos produtos e reduzir o tempo de processamento, comparado a técnica convencional. Este estudo teve como objetivo desenvolver um reator de bancada para PAM, utilizando biomassa de resíduos agrícolas para a produção de biochar. Um micro-ondas comercial foi modificado, incluindo um suporte de materiais refratários, onde foram adicionados 60 g de carbeto de silício (SiC) e acomodado um reator de quartzo. O reator foi equipado com sistemas de monitoramento da temperatura, sistema de injeção de CO₂ e extração dos gases. Como resultado preliminar, a pirólise da casca de café moída realizada sob as temperaturas de 400°C e 500°C, resultou no rendimento de biochar de 30,75 e 27,31% e teores de carbono fixo de 64,06 e 68,05%, respectivamente. Novos testes e ajustes serão realizados para otimizar o rendimento e a qualidade dos produtos obtidos no processo de PAM.

Palavras-chave: biomassa, biochar, resíduos agrícolas.

Development of reactor for microwave-assisted pyrolysis

Abstract: Microwave-assisted pyrolysis (MAP) stands out for improving product quality and reducing processing time compared to conventional techniques. The aim of this study was to develop a bench reactor for MAP, using agricultural waste biomass to produce biochar. A commercial microwave oven was modified, including a refractory material support, where 60 g of silicon carbide (SiC) was added and a quartz reactor accommodated. The reactor was equipped with temperature monitoring systems, a CO₂ injection system and a gas extraction system. As a preliminary result, the pyrolysis of ground coffee husks carried out at temperatures of 400°C and 500°C resulted in biochar yields of 30.75 and 27.31%; fixed carbon contents of 64.06 and 68.05%, respectively. Further tests and adjustments will be carried out to optimize the yield and quality of the products obtained in the PAM process.

Keywords: biomass, biochar, agricultural waste.

1. INTRODUÇÃO

As Nações Unidas estabeleceram como uma de suas metas garantir o acesso universal à energia, promovendo a eficiência energética e incentivando o uso de tecnologias sustentáveis, como as fontes renováveis (Potnuri *et al.*, 2023). Neste contexto, a gestão de resíduos sólidos agroindustriais desponta como uma estratégia promissora, permitindo a utilização desses resíduos como fonte de energia renovável,

além de agregar valor e reduzir o impacto ambiental do descarte inadequado (Potnuri *et al.*, 2023). A pirólise assistida por micro-ondas (PAM) é uma técnica promissora, com inúmeras vantagens, como a produção de biochar, um material rico em carbono usado principalmente para melhorar a fertilidade do solo e sequestrar carbono, além de reduzir emissões de gases de efeito estufa de qualidade superior em comparação com a pirólise tradicional (Lehmann; Joseph, 2024; Li *et al.*, 2024; Woolf *et al.*, 2010). Ademais, a PAM oferece aquecimento mais rápido e maior seletividade em relação a pirólise tradicional (Mohamad Aziz *et al.*, 2024). No entanto, ainda existem desafios para sua aplicação em escala industrial, especialmente quando combinada com técnicas como a torrefação (Mohamad Aziz *et al.*, 2024).

As micro-ondas com frequência de 915 MHz e 2450 MHz são usadas em aplicações comerciais e industriais, sendo a frequência de 2450 MHz, o comprimento de onda é de aproximadamente 12 cm (Motasemi; Afzal, 2013; Leite, 2021). O aquecimento por micro-ondas ocorre de dentro para fora do material, exigindo que este seja susceptível às micro-ondas. Biomassas secas, por exemplo, têm menor capacidade de aquecimento (Suresh *et al.*, 2021; Arpia *et al.*, 2021). Ademais, a seleção cuidadosa de equipamentos e técnicas é importante para a construção de um reator de bancada para PAM que seja seguro e eficaz.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um reator de bancada para a Pirólise Assistida por Micro-ondas (PAM) de biomassa de resíduos agrícolas, com foco na produção de biochar de alta qualidade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Montagem do Sistema para realização de PAM

Foi utilizado um micro-ondas doméstico, com potência nominal de 1600W e tensão de 220 volts, para a montagem do sistema para realização de pirólise assistida por micro-ondas (PAM). Com auxílio de uma furadeira foram feitos 3 furos na estrutura do micro-ondas, com diâmetro inferior a 4 cm, conforme descrito por Leite (2021). Esses furos permitiram a inserção de um termopar, a extração dos gases condensáveis e não condensáveis, e a inserção de gás inerte. Um equipamento de aferição de micro-ondas, modelo MW2020, foi utilizado para medição de vazamentos de micro-ondas.

Utilizou-se um termopar tipo K aterrado, em contato direto com a biomassa, conectado a um sistema de automação com Arduino e o software *LabVIEW*, para controle da temperatura e a ativação do reator de micro-ondas. O gás CO_2 foi empregado como gás de arraste para garantir uma atmosfera inerte no reator, escolhido por seu baixo custo ampla disponibilidade (Leite, 2021).

Um condensador Allihn, resfriado a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por um banho termostático, foi usado para condensar o bio óleo, enquanto os gases não condensáveis foram direcionados para uma capela de exaustão. Tijolos refratários, com um perfurado para acomodar carbeto de silício (SiC) como catalisador, foram utilizados como dispositivos auxiliares. O sistema construído para a realização de PAM é apresentado na figura 1.

Figura 1. Sistema para realização de PAM em operação.



Fonte: (Autor)

Para validar o sistema, 100 mL de água deionizada foram adicionados ao reator de quartzo e o aquecimento a 100°C foi realizado para testar o funcionamento do sistema de automação. Com o sistema validado foram iniciados os testes de pirólise com cascas de café *in natura*.

2.2 Produção de Biochar a partir de PAM

As cascas de café *in natura* (50 g) foram colocadas no reator de quartzo e o sistema foi operado a 400 e $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 20 minutos com uma vazão de 1 L/min de CO_2 para garantir a atmosfera inerte. Após este ensaio preliminar, observou-se que a carbonização da biomassa não foi completa, indicando a necessidade de ajustes.

Nesta fase, o SiC não foi utilizado como catalisador, apenas materiais refratários. Optou-se, então, por 50 g de cascas de café secas, moídas e peneiradas em peneira de 60 mesh. A metodologia foi repetida, mas desta vez, o reator de quartzo contendo a biomassa foi colocado sobre uma cama de materiais refratários, com uma cavidade contendo 60 g de SiC, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2. Reator de pirólise instalado em base refratária contendo SiC.



Fonte: (Autor)

Após o processo, os produtos da PAM foram quantificados. O rendimento gravimétrico do biochar e bio óleo foi obtido utilizando uma balança de precisão. O rendimento do biogás foi calculado pela diferença entre a biomassa inicial e a soma dos biochar e bio óleo obtidos. Os testes foram realizados em triplicata. Os percentuais de umidade, materiais voláteis e cinzas foram determinado conforme a norma D1762 (ASTM, 2021), e o teor de carbono fixo foi calculado pela diferença. Os dados estatísticos foram analisados utilizando o software MS Excel, com o coeficiente de variação calculado como o desvio padrão dividido pela média.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como indicado, a casca de café *in natura* não resultou em uma carbonização homogênea (Figura 3), provavelmente devido ao tamanho das partículas e a acomodação no reator, que ocupou mais espaço. Isso reflete os desafios relatados por Siddique *et al.*, (2022) para a implementação industrial da PAM, onde a formação do biochar, embora beneficie a absorção de micro-ondas, pode interferir na penetração das micro-ondas no reator (Siddique *et al.*, 2022).

Figura 3. Casca de café pirolisadas *in natura* (esquerda) e moída (direita).



Fonte: (Autor)

Com cascas de café secas, moídas e peneiradas a 0,25 mm, a carbonização ocorreu de forma homogênea (Figura 3), confirmando que o tamanho da partícula é importante para a realização do processo de PAM. Os rendimentos gravimétricos e as análises imediatas das cascas de café secas, moídas e peneiradas e *in natura* submetidas a PAM a 400 e 500 °C são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Rendimento gravimétrico e análise imediata do material *in natura* e produtos da pirólise assistida por micro-ondas nas temperaturas de 400 e 500°C.

Variáveis	Unidade	<i>In Natura</i>	CV%	400°C	CV%	500°C	CV%
Rendimento em Bio óleo	(%)	-	-	14,47	4,84	11,81	7,01
Rendimento em gases não condensáveis	(%)	-	-	54,78	0,12	60,88	1,76
Rendimento em biochar	(%)	-	-	30,75	2,48	27,31	6,18
Teor de materiais voláteis	(%)	73,43	0,97	24,48	5,69	16,36	9,70
Teor de cinzas	(%)	5,65	5,66	11,46	13,25	15,59	7,38
Teor de carbono fixo	(%)	20,93	1,93	64,06	0,71	68,05	1,53

CV% = Coeficiente de Variação.

A variação das temperaturas de pirólise (400°C e 500°C) afetou os rendimentos dos produtos. A 400°C, os rendimentos de gases condensáveis e biochar foram maiores, indicando que essa temperatura é mais favorável para a produção desses componentes. Por outro lado, o rendimento de gases não condensáveis foi maior a

500°C, possivelmente devido à decomposição térmica mais eficiente dos componentes voláteis a essa temperatura, conforme descrito por Islam *et al.* (2024) para a PAM de resíduos de café. Observou-se a correlação entre a maior concentração de cinzas e o aumento da temperatura de pirólise, com uma redução no teor de voláteis e um aumento no teor de carbono fixo, como relatado por Setter *et al.* (2020) na pirólise convencional de briquetes de casca de café. A qualidade do biochar produzido diretamente influenciada pelas condições de temperatura e pelo tamanho das partículas da biomassa, com maiores rendimentos gravimétricos à 400°C e com maior teor de carbono fixo a temperaturas mais elevadas como 500°C.

O sistema de aferição de temperatura é essencial para o monitoramento e controle durante a PAM. No entanto, a medição instantânea da temperatura da biomassa é desafiadora devido à interferência das micro-ondas no termopar tipo K (Siddique *et al.*, 2022). Ademais, o uso do SiC como catalisador foi confirmado como eficaz para melhorar o aquecimento (Fan *et al.*, 2019). Portanto, as melhorias, incluindo a adição de SiC e os processos de secagem, moagem e peneiramento das cascas de café, resultaram em uma carbonização mais homogênea. Contudo, é necessário otimizar o sistema PAM para aumentar a produção de bio óleo, como indicado pelo elevado rendimento de gases não condensáveis, de 54,78% a 400°C e 60,88% a 500°C. Uma possível solução seria melhorar o sistema de condensação dos gases da pirólise, por meio da instalação de condensadores adicionais, a fim de maximizar a captura dos produtos condensáveis.

4. CONCLUSÃO

Os resultados indicam que a temperatura de pirólise afeta o rendimento e a qualidade dos produtos na PAM. A 400°C obtivemos maior quantidade de gases condensáveis e biochar, enquanto a 500°C, houve maior produção de gases não condensáveis, confirmando a importância da temperatura. A utilização de cascas de café secas e peneiradas melhorou a homogeneidade da carbonização. A adição de SiC como catalisador foi eficaz para otimizar o aquecimento e o rendimento da fração sólida. No entanto, o sistema precisa ser ajustado para melhorar a produção de bio óleo e solucionar desafios relacionados à medição precisa da temperatura da biomassa.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a instituição de ensino Universidade Federal de Lavras pela infraestrutura para realização do presente estudo e as agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG.

6. REFERÊNCIAS

ARPIA, A. A.; CHEN, W.; LAM, S. S. et al. Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: A comprehensive review. **Chemical Engineering Journal**. v. 403, p. 126233, 2021

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1762**: Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. West Conshohocken: ASTM, 2021.

ISLAM, K. M. O.; AHMAD, N.; ALBOQAMI, F. et al. Utilization of coffee waste for biofuel production through catalytic microwave-assisted pyrolysis approach. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2024.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. 3rd edition. New York, NY: Routledge, 2024.

LEITE, J. C. S. **Desenvolvimento de processo de pirólise de biomassa assistido por micro-ondas: montagem, controle e análise de variáveis**. 2021. Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2021.

LI, J.; LIN, L.; JU, T. et al. Microwave-assisted pyrolysis of solid waste for production of high-value liquid oil, syngas, and carbon solids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 189, p. 113979, 2024.

MOHAMAD AZIZ, N. A., MOHAMED, H; KANIA, D. et al. Bioenergy production by integrated microwave-assisted torrefaction and pyrolysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 191, p. 114097, 2024.

MOTASEMI, F.; AFZAL, M. T. A review on the microwave-assisted pyrolysis technique. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 317–330, 2013.

POTNURI, R.; SURYA, D. V.; RAO, C. S. et al. A review on analysis of biochar produced from microwave-assisted pyrolysis of agricultural waste biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 173, p. 106094, 2023.

SIDDIQUE, I. J.; SALEMA, A. A.; ANTUNES, E. et al. Technical challenges in scaling up the microwave technology for biomass processing. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 153, p. 111767, 2022.

SURESH, A.; ALAGUSUNDARAM, A.; KUMAR, P. S. et al. Microwave pyrolysis of coal, biomass and plastic waste: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, n. 5, p. 3609–3629, 2021

WOOLF, D.; AMONETTE, J. E.; STREET-PERROTT, F. A. et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change. **Nature Communications**, v. 1, n. 1, p. 56, 2010.