

Efeito das variáveis de processo na emissão de gases durante a carbonização da madeira de eucalipto

Rafaella D. Ramos¹, Dalton L. Junior¹, Laura da S. Rocha¹, João V. M. da Silva¹, Ananias F. D. Junior²

¹ Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, ² Universidade Federal do Espírito Santo
ra.fadias@hotmail.com

Resumo: A carbonização da madeira é realizada predominantemente por fornos de alvenaria de tecnologia rudimentar, sem a recuperação dos gases da carbonização, gerando desperdício energético no processo e impacto ambiental negativo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da temperatura final de carbonização e da taxa de aquecimento nos rendimentos do processo de carbonização de madeiras de eucaliptos cultivadas na região Norte da Bahia. Foram realizadas carbonizações com sistema de coleta dos gases condensáveis, em cinco temperaturas finais de carbonização (280, 330, 380, 430, 480 °C) e duas taxas de aquecimento (0,84 °C/min e 1,74 °C/min). Os resultados indicaram que o aumento da temperatura final de carbonização converteu a madeira em uma maior quantidade de gases totais, intensificado pelo uso de maior taxa de aquecimento. A fração condensável dos gases diminuiu com o aumento da temperatura, principalmente quando utilizada uma maior taxa de aquecimento.

Palavras-chave: Carvão vegetal, Gases condensáveis, Gases não condensáveis, Licor pirolenhoso.

Effect of process variables on gases emissions during eucalyptus wood carbonization

Abstract: Wood carbonization is predominantly carried out in rudimentary kilns without recovering carbonization gases, resulting in energy waste and negative environmental impact. The objective of this study was to evaluate the effect of the final carbonization temperature and heating rate on the carbonization process yield of eucalyptus wood cultivated in the north region of Bahia. Carbonizations were performed in an electric furnace with a water-cooled condenser and a condensable gases collector, at five final carbonization temperatures (280, 330, 380, 430, 480 °C) and two heating rates (0.84 °C/min and 1.74 °C/min). The results indicated that increasing in the final temperature of carbonization converted the wood into a greater quantity of total gases, mainly using the higher heating rate. The condensable gases fraction decreasing when increasing final temperature, mainly using a higher heating rate.

Keywords: Charcoal, Condensable gases, Non-condensable gases, Pyroligneous extract.

1. INTRODUÇÃO

Considerado como referência mundial em produtividade, o Brasil possui uma área de aproximadamente 10 milhões de hectares com plantios de árvores comerciais,

sendo o eucalipto a espécie mais utilizada para a produção de carvão vegetal. O Brasil é o principal produtor mundial de carvão vegetal, com uma contribuição de 7,0 milhões de toneladas produzidas em 2022 (IBÁ, 2023). Nesse contexto, a Bahia destaca-se como uma grande produtora de florestas cultivadas, com uma área de 664 mil hectares e uma produção de carvão vegetal de 157.848 toneladas (IBGE, 2022).

A produção nacional de carvão vegetal é caracterizada, em sua maioria, pela utilização de fornos rudimentares de alvenaria, o que resulta em baixos rendimentos e na não captura dos gases de efeito estufa (GEE) liberados para o meio ambiente durante o processo de carbonização (Costa *et al.*, 2020). Esses fornos emitem quantidade significativa de gases poluentes e particulados na atmosfera, causando danos ambientais e desperdício de energia no processo (Santos *et al.*, 2013).

Um dos desafios enfrentados pela indústria siderúrgica brasileira é a heterogeneidade do carvão vegetal utilizado na fabricação do aço, em termos de suas características físicas, químicas e mecânicas, além do baixo rendimento nos processos de carbonização. As características do processo de carbonização, como a temperatura final, é uma das principais responsáveis por essas variações (Vieira, 2012).

Segundo Costa *et al.* (2020), a temperatura final de carbonização tem uma influência direta na qualidade do carvão vegetal. Dessa forma, a temperatura final do processo determina a qualidade do carvão, influenciando diretamente o rendimento gravimétrico e as propriedades do carvão, como densidade aparente, teor de carbono fixo e resistência mecânica. Um controle adequado da temperatura de carbonização melhora a eficiência do processo e a qualidade final do carvão vegetal. Além disso, a relação entre a temperatura de carbonização e a emissão de gases é um ponto importante a ser considerado. Temperaturas elevadas causam uma maior emissão de gases condensáveis (GC) e não condensáveis (GNC), prejudicando a eficiência do processo e aumentando os impactos ambientais (EMBRAPA, 2007).

A compreensão sobre as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) ao longo da cadeia de produção do carvão vegetal se torna ainda mais evidente ao considerar as frações de gases condensáveis (GC) e não condensáveis (GNC) geradas durante a carbonização. Em operações que utilizam tecnologias rudimentares, as emissões de GEE são mais significativas. Estima-se que durante a carbonização sejam emitidos



de 1 a 2,4 Gt de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) por ano. Em casos de operações muito ineficientes, a emissão de GEEs, inclusive devido ao desmatamento, pode chegar a 9 kg de CO₂e por quilograma de carvão vegetal produzido (Iiyama *et al.*, 2014). Esses números destacam a importância de melhorias nas tecnologias de produção de carvão vegetal para reduzir não apenas a emissão total de GEEs, mas também para controlar as frações de GC e GNC liberadas no processo.

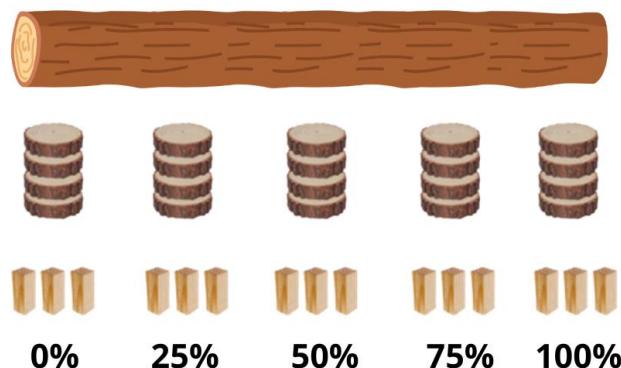
Diante disso, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar o efeito da temperatura final e da taxa de aquecimento na emissão de gases condensáveis e não condensáveis após o processo de carbonização de madeiras de eucalipto cultivadas na região Norte da Bahia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área e amostragem da madeira

As carbonizações foram realizadas no Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (Woodtech) da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), no campus de Vitória da Conquista, BA. Cinco árvores de *Eucalyptus* spp. com aproximadamente 6,2 anos foram colhidas, num espaçamento de 4,0 x 1,92 m e com densidade básica de 519 kg/m³, em plantio localizado na região Litoral Norte da Bahia. Foram retirados discos de madeira em diferentes posições do tronco: a 1,3 m (DAP), e os outros a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (diâmetro mínimo = 8 cm), conforme Figura 1.

Figura 1. Método de amostragem empregado para o fracionamento do tronco.





Os discos foram cortados em amostras menores com dimensões de aproximadamente 2,0 cm x 2,7 cm x 4,3 cm (altura x largura x comprimento) e misturados para maior homogeneidade.

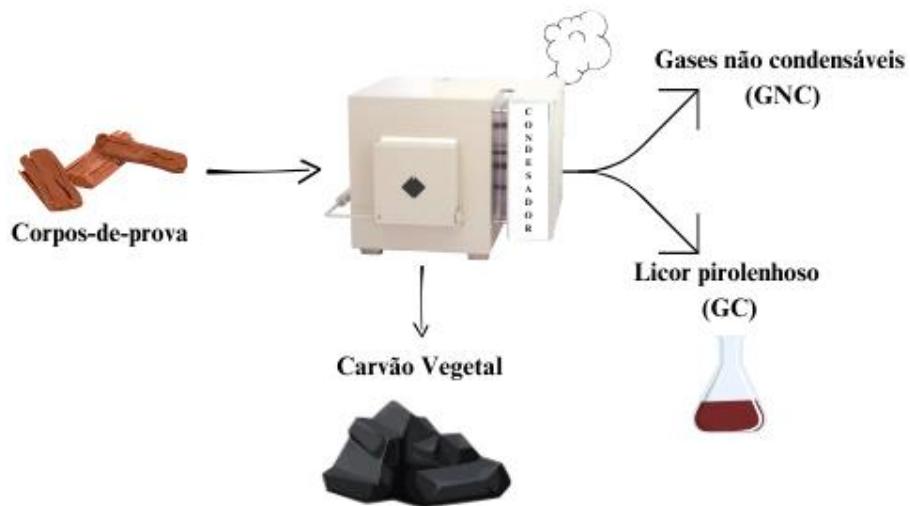
2.2 Carbonização da madeira

As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico tipo mufla com condensador resfriado à água e coletor de gases condensáveis (licor pirolenhoso), em cinco temperaturas finais de carbonização (280, 330, 380, 430, 480 °C) com taxas de aquecimento de 0,8 °C/min e 1,7 °C/min, totalizando dez tratamentos. Cada carbonização foi realizada com três repetições, com cerca de 335 g secas de madeira, e a temperatura inicial do ensaio foi de 100 °C.

2.3 Avaliação dos processos de carbonização e da qualidade do carvão vegetal

A carbonização da madeira (Figura 2) foi avaliada pelo rendimento gravimétrico em carvão vegetal (CV), conforme Equação 1; rendimento gravimétrico em gases condensáveis – licor pirolenhoso (GC), conforme Equação 2; e rendimento gravimétrico em gases não condensáveis (GNC), conforme Equação 3.

Figura 2. Processo de carbonização da madeira e seus produtos/resíduos finais.



$$CV = \frac{M_{cv}}{M_m} * 100 \quad \text{Equação 1}$$

Sendo: CV = rendimento gravimétrico de carvão vegetal (%); M_{cv} = massa do carvão (g); M_m = massa da madeira (g).

$$GC = \frac{M_{GC}}{M_m} * 100 \quad \text{Equação 2}$$

Sendo: GC = rendimento gravimétrico de gases condensáveis (%); M_{GC} = massa de gases condensáveis (g); M_m = massa da madeira (g).

$$GNC = 100 - (CV + GC) \quad \text{Equação 3}$$

Sendo: GNC = rendimento gravimétrico de gases não condensáveis (%); CV = rendimento gravimétrico de carvão vegetal (%); GC = rendimento gravimétrico de gases condensáveis (%).

2.4 Análise estatística

A análise dos dados foi realizada por meio de estatística descritiva, com ajustes de modelo de regressão com a utilização do software Microsoft Office EXCEL (2007).

Os modelos de regressão foram comparados pelo Teste de Identidade de Modelos, de acordo com Regazzi (2003), para testar a igualdade das taxas de aquecimento. Em caso de igualdade, um modelo comum foi utilizado para representar toda a variação das taxas de aquecimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A temperatura final exerce forte influência no processo de carbonização da madeira, na qualidade do produto final (carvão vegetal) e na quantidade de gases liberados para a atmosfera. O rendimento gravimétrico em gases totais (RGT) apresentou uma tendência de aumento à medida que a temperatura final de carbonização aumentou para ambas as taxas de aquecimento estudadas, variando entre 48% e 67% para taxa de aquecimento de 0,8 °C/min e entre 54% e 69% para taxa de aquecimento de 0,8 °C/min. À medida que houve aumento na temperatura final de carbonização, houve uma tendência de aproximação no RGT. Além disso, o valor do coeficiente de determinação para ambas taxas de aquecimento ($R^2 = 0,99$) indicou uma alta correlação entre o RGT e a temperatura final de carbonização, ou seja, 99% da variação no rendimento gravimétrico em gases totais pode ser explicada pela variação da temperatura final de carbonização, conforme mostrado na Figura 3A.

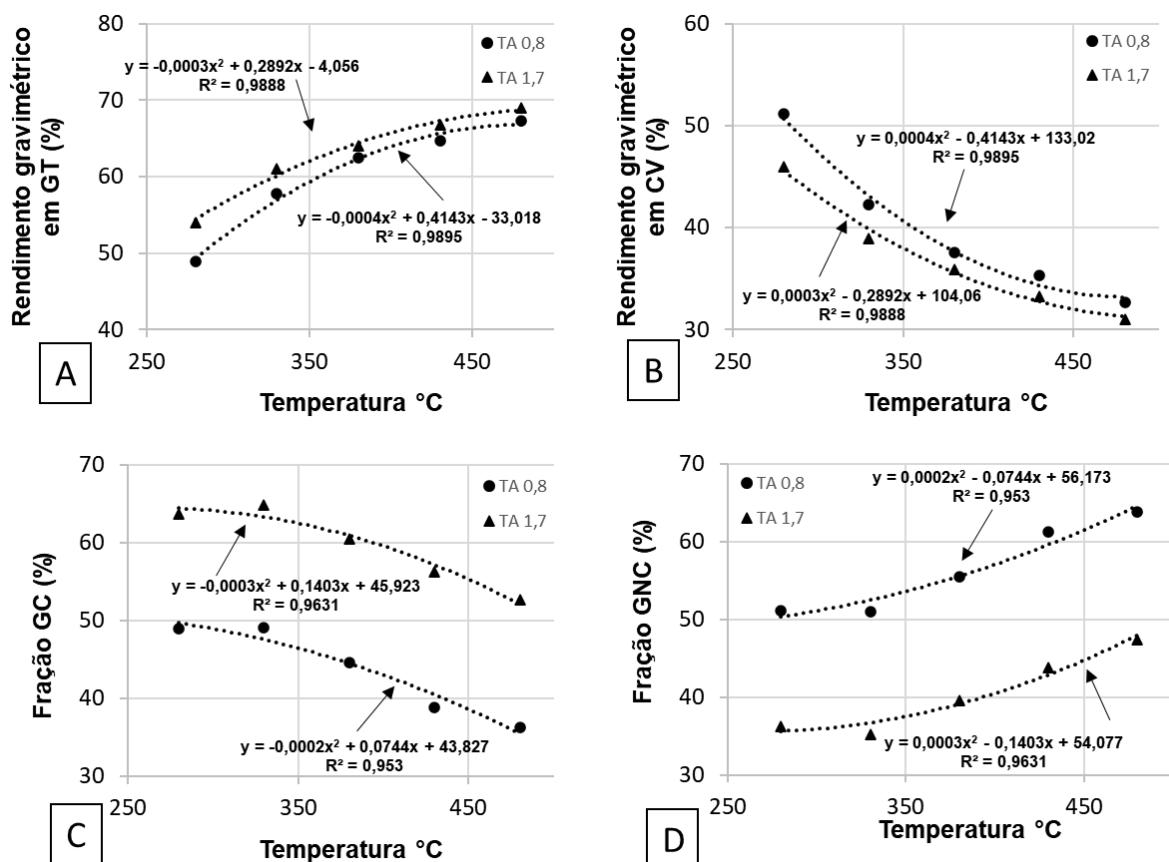
Essa tendência do aumento da emissão dos gases totais pode ser comprovada pelo comportamento do rendimento gravimétrico em carvão vegetal (CV), que diminuiu à medida que a temperatura final de carbonização aumentou para ambas as



taxas de aquecimento. Ou seja, a redução do CV com o aumento da temperatura final de carbonização indicou que a maior parte da madeira se transformou em gases totais, em vez de carvão sólido, pelo fato da decomposição térmica da madeira favorecer a formação desses gases totais.

É notório que a relação entre temperatura final e emissões gasosas é importante para a compreensão do impacto ambiental negativo em decorrência do processo de carbonização. Torna-se claro que não se trata apenas de uma questão de eficiência produtiva de produção de carvão, mas também da mitigação dos impactos ambientais adversos.

Figura 3. Influência da temperatura final de carbonização e taxa de aquecimento no rendimento gravimétrico de gases totais (A); rendimento gravimétrico de carvão vegetal (B); fração de gases condensáveis (C) e fração de gases não condensáveis (D).



Os cultivos florestais de rápido crescimento são sem dúvida uma excelente estratégia de produção renovável e sustentável de carvão vegetal, sem questionamento, quando comparada a utilização do carvão mineral. Entretanto, é necessário considerar não somente o rendimento gravimétrico e a qualidade do



carvão vegetal, mas também a implementação de sistemas de captura e tratamento dos gases, como os sistemas Fornos-Fornalha (Ribeiro *et al.* (2020), para contribuir tanto para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal quanto para a proteção do meio ambiente.

Sobre a fração de gases condensáveis (GC) foi possível observar uma tendência de decréscimo à medida que se aumentou a temperatura final de carbonização para ambas as taxas de aquecimento, variando entre 48% e 36% (taxa de aquecimento 0,8 °C/min) e 64% a 52% (taxa de aquecimento 1,7 °C/min). A utilização de uma maior taxa de aquecimento (1,7 °C/min) levou a possibilidade de uma maior fração de gases que podem ser reaproveitados e evitados de serem emitidos para atmosfera.

Além disso, o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,96$ e $0,95$) revelou uma correlação significativa entre a fração de GC e a temperatura final de carbonização, o que pode ser atribuído à maior volatilização dos compostos presentes nesta fração, conforme Figura 3C. Em outras palavras, aproximadamente 96% e 95% da variação na fração de gases condensáveis pode ser explicada pela variação da temperatura final de carbonização. Comportamento contrário foi observado na fração de gases não condensáveis (GNC), a qual apresenta uma tendência de aumento à medida que a temperatura final de carbonização aumentou, variando entre 51% e 63% para taxa de aquecimento 0,8 °C/min, e 36% a 47% para taxa de aquecimento 1,7 °C/min.

O Teste de Identidade de Modelos indicou que as diferentes taxas de aquecimento utilizadas neste estudo (0,8 °C/min e 1,7 °C/min) permitiram comportamentos estatisticamente significativos para as diferentes temperaturas finais analisadas, para todas as características das carbonizações avaliadas (rendimento em gases totais, rendimento em carvão vegetal, fração de gases condensáveis e fração de gases não condensáveis), o que significou que a velocidade de aquecimento influenciou significativamente os resultados do processo de carbonização deste estudo.

4. CONCLUSÃO

O aumento da temperatura final de carbonização resultou em uma maior conversão da madeira em gases totais, principalmente na fração GNC.

A taxa de aquecimento maior (1,74 °C) intensificou a geração de gases totais e favoreceu uma maior fração de gases condensáveis.



Esse estudo ressalta a importância de considerar as emissões atmosféricas nos processos de carbonização e da necessidade de utilizar tecnologias mais eficientes para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e aumentar a sustentabilidade da produção de carvão vegetal.

5. REFERÊNCIAS

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H.; **Conversão direta da madeira em calor e energia. In: "Bioenergia e Biorrefinaria - Cana-de-açúcar e Espécies Florestais".** Viçosa, MG. p. 355 – 378, 2013.

COSTA, J. M. F. N.; CARNEIRO, A. C. O.; LADEIRA, A. M. M. et al. Influência da temperatura da pirólise nas emissões gasosas, rendimentos e densidade do carvão vegetal. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**. v. 11, n. 1, 2020.

EMBRAPA. Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e Cerrado. **Embrapa Cerrados**, Planaltina, 2007.

IBGE. **Produção de Carvão Vegetal (Silvicultura)**: gráficos mapas. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/carvao-vegetal_silvicultura/ba. Acesso em 01 de agosto de 2024.

IBÁ – Indústria Brasileira de produtores de Árvores. **Relatório IBÁ 2023 ano base 2022**. Brasília: 2023. 46 p.

IIYAMA, M.; CHENEVOY, A.; OTIENO, E. et al. **Achieving sustainable charcoal in Kenya: harnessing the opportunities for crosssectoral integration**. Technical brief. World Agroforestry Centre (ICRAF): Nairobi, Kenya, 2014.

REGAZZI, A. J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear. **Revista Ceres**. v 50, n 287, 2003.

RIBEIRO, G. B. D.; CARNEIRO, A. C. O.; LANA, A. Q. et al. Economic Viability Of Four Charcoal Productive Systems From Minas Gerais State. **Revista Árvore**. v. 44, 2020.

VIEIRA, R. S.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C. et al. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. **Cerne**, Lavras. v. 19, p. 59-64, 2012.