

## Secagem e pré-pirólise da madeira utilizando os gases combustos do queimador

Davi Pimenta Fialho<sup>1</sup>; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro<sup>1</sup>; Pedro Augusto Teixeira de Oliveira<sup>1</sup>; Evanderson Luis Capelete Evangelista<sup>1</sup>; João Gilberto Meza Ucella Filho<sup>1</sup>; Camila Batista Da Silva Lopes<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa/MG, Brasil; <sup>2</sup> Maringá Ferro-Liga, Itapeva/SP; Brasil – lapem@ufv.br

**Resumo:** Durante a carbonização, há liberação de gases poluentes. Para mitigar isso, a incineração em queimadores é uma opção. Além de reduzir emissões, pode-se usar a energia térmica gerada, na carbonização, secagem e pré-pirólise. Sendo assim, objetivou-se avaliar o uso de gases combustos do queimador de um sistema fornos-fornalha, na secagem e pré-pirólise da madeira de *Eucalyptus urophylla*. Realizou-se quatro tratamentos com diferentes temperaturas de estabilização de copa (270°C; 200°C e 150°C com tiragem a 2,1m da fornalha e 150°C com tiragem a 1,5m), e foram determinados o rendimento gravimétrico e propriedades do carvão vegetal. O uso de gases combustos coletados a 1,5m de altura não implicou em dificuldades no controle da carbonização, diferente dos coletados a 2,1m, e aumentou o rendimento gravimétrico. Por fim pôde-se concluir que a secagem dentro do forno mostrou-se um processo viável, mas que ainda requer um maior aprimoramento da técnica.

**Palavras-chave:** Fornalha; Aproveitamento térmico; Fluídos quentes.

### Drying and pre-pyrolysis of wood using burner combusted gases

**Abstract:** During carbonization, polluting gases are released. To mitigate this, incineration in burners is an option. In addition to reducing emissions, the thermal energy generated can be used in carbonization, drying, and pre-pyrolysis. Therefore, the objective was to evaluate the use of combusted gases from the burner of a kilns-furnace system in the drying and pre-pyrolysis of *Eucalyptus urophylla* wood. Four treatments were carried out with different dome stabilization temperatures (270°C; 200°C and 150°C with draft at 2.1m of the furnace and 150°C with draft at 1.5m), and the gravimetric yield and properties of charcoal were determined. The use of combusted gases collected at 1.5 m did not result in difficulties in controlling carbonization, unlike those collected at 2.1 m, and increased the gravimetric yield. Lastly, it could be concluded that drying within the kiln proved to be a viable process, but it still requires further refinement of the technique.

**Keywords:** Furnace; Thermal recovery; Hot fluids.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal, sendo responsável por 12% da produção mundial (IBÁ, 2023). Destaca-se que cerca de 94% da produção de carvão vegetal é obtida utilizando-se madeira proveniente de

florestas plantadas, especialmente do gênero *Eucalyptus* (IBÁ, 2023). Um os principais gargalos da utilização da madeira é a secagem, visto que comumente é feita ao ar livre, o que necessita de um longo período de tempo para atingir menor teor de umidade, sendo recomendado para a carbonização umidade da madeira inferior a 40% (COPAM, 2018), pois quanto menor o teor de umidade da madeira, maior será o rendimento gravimétrico, menor geração de finos, menor emissão de poluentes e maior produtividade das unidades produtores de carvão vegetal.

A transformação da madeira em carvão vegetal ocorre por meio de conversão termoquímica, denominada carbonização (Pecha; Garcia-Perez, 2020). Esta transformação resulta em gases condensáveis e gases não condensáveis, além do carvão vegetal (Roy; Dias, 2017). Durante o processo de carbonização destaca-se a liberação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e o metano (CH<sub>4</sub>), que são gases do efeito estufa. Diante disso, em consonância com a COP 21, é crucial o emprego de fontes renováveis na produção, visando mitigar emissões e reduzir a dependência de recursos não renováveis.

Sabe-se que mesmo aumentando a eficiência do processo de carbonização, existe liberação de gases para o ambiente. Uma das alternativas para mitigar esse problema é a incineração dos mesmos em queimadores (fornalhas), visto que esses gases são substâncias combustíveis ricas em carbono e hidrogênio, podendo ser queimados sob condições adequadas de temperatura e pressão, na presença de oxigênio. A energia térmica liberada com a queima dos gases da carbonização pode ser destinada para diversos fins, como secagem de grãos, geração de energia elétrica, aquecimento de granjas e até mesmo utilizada no próprio processo de carbonização (Cardoso, 2015).

Neste contexto, utilizar os gases combustos provenientes de queimadores de gases torna-se uma excelente alternativa para reduzir o consumo de madeira, dentro do forno de carbonização, para suprir a energia demandada na fase de secagem. Isso contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE), maior sustentabilidade e produtividade da cadeia de produção de carvão vegetal, além de gerar maior competitividade do setor no cenário atual. Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi utilizar os gases combustos da carbonização, para secagem e pré-pirólise da madeira de *Eucalyptus urophylla*, em uma planta piloto adaptada do sistema fornos-fornalha.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Características da biomassa e área de estudo**

A madeira usada nesse estudo foi proveniente de um clone comercial de *Eucalyptus urophylla* (clone I144), de uma floresta com 7 anos. As toras utilizadas tinham diâmetro variando entre 9,0 e 20,0 cm e comprimento de 1,0 m. Foram utilizados três centros de classe (10,5; 14,5 e 18,5 cm) com amplitude de  $\pm 1,5$  cm e o carregamento dos fornos e a carbonização da madeira foi realizado como descrito por Siqueira (2021). As carbonizações foram realizadas no sistema fornos-fornalha, construído no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), o qual possui um conjunto de quatro fornos circulares, ligados por meio de um duto a um queimador central (Figura 1a e 1b).

### **2.2 Descrição do sistema de aproveitamento dos gases combustos do queimador para realização da secagem e pré-pirólise**

O processo de carbonização da madeira foi conduzida de acordo com a metodologia proposta por Cardoso (2015). O sistema utilizado para se aproveitar os gases combustos do queimador para a secagem seguida da pré-pirólise delineado pelas figuras 1c e 1d, foi composto pelas seguintes partes:

I) Tubulações de tiragem dos gases combustos da chaminé do queimador: Para realizar a exaustão dos gases combustos foi utilizada tubulações metálicas, a qual foi realizada na chaminé do queimador. Foi usada duas tubulações metálicas para o transporte dos gases da chaminé sendo essas, uma a 2,1 m (tubulação 1) e a outra a 1,5 m (tubulação 2) de acordo com o tratamento. Além das tubulações para a tiragem dos gases foi conectada uma outra tubulação para o transporte dos gases combustos até ao ventilador centrífugo (Figura 1c e 1d).

II) Válvulas de segurança: como medida de segurança, instalou-se duas válvulas do tipo borboleta nas tubulações metálicas de tiragem dos gases, para se necessário interromper o fluxo de gases combustos (Figura 1d).

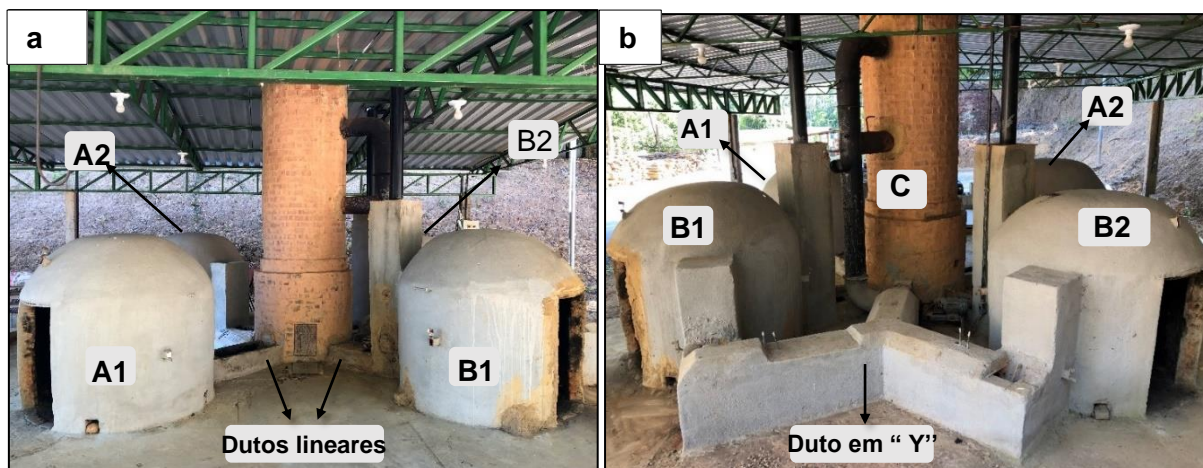
III) Ventilador centrífugo: No final da tubulação instalou-se um ventilador centrífugo responsável de succionar os gases combustos na chaminé até os fornos onde foi realizada a secagem e pré-pirólise (Figura 1c).

IV) Duto em formato “Y”: Após o ventilador centrífugo conectou-se um duto em formato de “Y” responsável pela condução dos gases combustos até os fornos de secagem e pré-pirólise (Figura 1c).

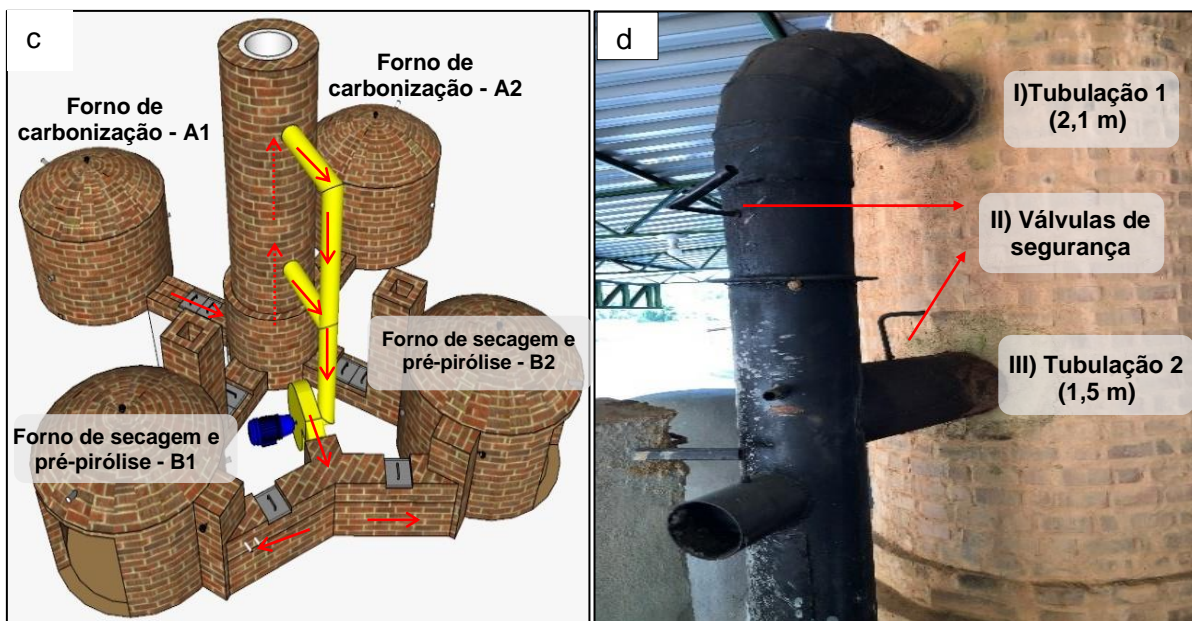
V) Local de entrada dos gases combustos nos fornos de secagem e pré-pirólise: Abertura localizada na lateral do forno, abaixo da copa para a entrada dos gases combustos nos fornos de secagem e pré-pirólise (Figura 1c).

VI) Chaminé dos fornos de secagem e pré-pirólise: Em cada forno foi construída uma chaminé, para a exaustão dos gases resultantes do processo de secagem (Figura 1c)

**Figura 1.** Vista frontal (Figura 1a) e vista lateral (Figura 1b) do sistema fornos-fornalha adaptado utilizado no experimento, em que A1 e A2 correspondem aos fornos de carbonização convencional, B1 e B2 aos fornos de secagem e pré-pirólise e C ao queimador central. Direção dos gases provenientes dos fornos de carbonização, passando pelo queimador central para combustão e sendo direcionados para os fornos de secagem e pré-pirólise (Figura 1c) e detalhes da tubulação metálica de tiragem de gases combustos da chaminé do queimador (Figura 1d).







Fonte: (Lopes, 2022)

### 2.3 Descrição dos tratamentos e parâmetros avaliados

Foram conduzidos quatro tratamentos, além da testemunha, sendo realizadas duas repetições para cada, estes foram definidos pela temperatura de estabilização da copa e pela altura de coleta dos gases combustos do queimador, utilizou-se as seguintes faixas de temperatura:  $T1 = 270 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T2 = 200 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $T3 = 150 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $T4 = 150 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , sendo que os tratamentos 1, 2 e 3 a altura de tiragem foi 2,1 m de altura e o tratamento 4 a 1,5 m de altura. Os parâmetros avaliados durante o experimento foram as faixas de temperaturas atingidas durante as carbonizações, o rendimento gravimétrico e as propriedades químicas do carvão vegetal, determinados de acordo com a metodologia adotada por (Lopes, 2022). Para as análises estatísticas foram realizados os testes de Tukey e Dunnett, os quais foram executados com o auxílio do software Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Temperaturas médias obtidas na copa do forno durante a carbonização

Durante os tratamentos de secagem e pré-pirólise foi observado aumentos abruptos de temperatura, sendo necessário parar a injeção de gases combustos por certo tempo, até que a temperatura do forno reduzisse. Notou-se que os tratamentos com gases combustos succionados a 1,5 m de altura tiveram uma menor

instabilidade de temperatura em relação aos demais tratamentos (Tabela 1), esse fato pode estar relacionado à quantidade de oxigênio contido nos gases insuflados, visto que quando a sucção foi realizada a 2,1 m de altura, o ar ambiente a cima do queimador também pode ter sido succionado.

**Tabela 1.** Temperaturas médias (°C) obtidas na copa dos fornos por meio de termopar durante as carbonizações

Tratamento	Fases da carbonização			
	I	II	III	IV
<b>T1(2,1 m)</b>	96,3 c*	296,4 a	387,3 a	391,8 ab
<b>T2(2,1 m)</b>	108,1 ab*	291,8 a	387,6 a	398,1 ab
<b>T3(2,1 m)</b>	115,9 a*	253,4 ab*	393,3 a	387,7 b
<b>T4(1,5 m)</b>	100,1bc*	217,8 b*	392,2 a	400,6 a
<b>Testemunha</b>	194,2	314,4	387,6	393,4
<b>a</b>				

(Médias na vertical seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey e “\*” indica médias estatisticamente diferentes à testemunha pelo teste de Dunnett, ambos a 95% de probabilidade).

### 3.2 *Rendimento gravimétrico*

O rendimento gravimétrico é um fator importante para se avaliar a produtividade de carvão, e a partir dele pode-se planejar a quantidade de madeira necessária para suprir a demanda de carvão vegetal. Para os tratamentos 1, 2 e 3 o rendimento foi estatisticamente o mesmo ( $\pm 31,82\%$ ), enquanto o quarto foi o maior rendimento obtido ( $\pm 38,89\%$ ), tendo um aumento de 23,4% em relação a carbonização convencional (31,52%).

A secagem de toras é uma etapa fundamental no processo de produção de carvão vegetal, pois reduz a umidade da madeira, melhorando a eficiência da carbonização e a qualidade do carvão produzido (Zanuncio et al., 2014). A secagem adequada pode minimizar a formação de fissuras e deformações nas toras, preservando suas propriedades estruturais (Zanuncio et al., 2014). Portanto, a pré-pirólise utilizando gases combustos não só contribui para um aumento significativo no rendimento gravimétrico, como também melhora a uniformidade da carbonização, resultando em um produto final com características mais homogêneas e menor teor de cinzas.

### 3.3 *Propriedades químicas do carvão vegetal*

Avaliou-se principalmente o teor de carbono fixo (CF) e cinzas (CZ) do carvão vegetal produzido, apresentados na tabela 2.

**Tabela 2.** Propriedade dos carvões vegetais em função dos tratamentos

Tratamento	Propriedades	
	CF (%)	CZ (%)
<b>T1</b>	79,05 ab*	0,55 a*
<b>T2</b>	78,58 b*	0,54 a*
<b>T3</b>	80,25 ab*	0,43 a*
<b>T4</b>	81,12 a*	0,47 a*
<b>Testemunha</b>	74,88	0,71

(Médias na vertical seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey e “\*” indica médias estatisticamente diferentes à testemunha pelo teste de Dunnett, ambos a 95% de probabilidade).

Em relação ao carbono fixo, obtivemos um aumento significativo nos tratamentos quando comparado com a testemunha, sendo o tratamento quatro com o maior valor de carbono fixo, porém esses teores de carbono fixo estão à cima do desejado para siderurgia que deve estar entre 75% e 80% (Pereira et al., 2013). Entretanto, esse valor pode ser facilmente reduzido diminuindo o tempo da última fase de carbonização. Para o setor da siderurgia, espera-se que o teor de cinzas formado seja inferior a 1% (Pereira et al., 2013). Obtivemos valores de teor de cinzas dentro do desejado, sendo inferiores a 1%..

#### 4. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o uso de gases combustos coletados a 2,1 m de altura, não foi viável, visto que ocorreu uma grande dificuldade no controle da carbonização e, além disso, não houve aumento no rendimento gravimétrico. Entretanto, o uso de gases combustos coletados a 1,5 m de altura teve uma maior facilidade de controle e aumentou os ganhos em rendimento gravimétrico. Dessa forma, entende-se que uso do queimador pode ser viável, mais ainda é necessário à realização de mais estudos para aprimoramento da técnica e maior facilidade de controle da carbonização.

## 5. AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV), à empresa ArcelorMittal, à Sociedade de Investigações Florestais e a EMBRAPII (Unidade Fibras Florestais).

## 5. REFERÊNCIAS

CARDOSO, Marco Tulio. **Secagem de toras para produção de carvão vegetal utilizando a queima de gases de carbonização**. 2015. 76p. Tese (Doutorado em Ciência florestal) –Universidade Federal de Viçosa, 2015

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. 2023. **Relatório 2023: ano base 2022**. 2023, 91p.

PECHA, B. M.; GARCIA-PEREZ, M. **Pyrolysis of lignocellulosic biomass: oil, char, and gas**. Chapter 29. 39p. National Renewable Energy Laboratory, USA; Washington State University, Richland, WA, USA. 2020

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L. et al. Influence of chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources.**, v. 8, p. 4574-4592, 2013.<sup>a</sup>

ROY, P.; DIAS, G. Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.**, United Kingdom., v. 77, p. 59-69, 2017.

SIQUEIRA,Humberto Fauller. **Aproveitamento dos gases da carbonização para secagem da madeira e produção de carvão vegetal**. 2021. 116p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 2018.

STATSOFT, Inc. STATISTICA (data analysis software system), version 7. 2004.



ZANUNCIO, A. J. V.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, F. S.  
Secagem ao ar livre da madeira para produção de carvão vegetal. *Floresta e Ambiente*, v. 21, n. 3, p. 401-408, 2014.