

## **Efeito da temperatura dos gases da carbonização de *Corymbia* sp. no rendimento de extrato pirolenhoso**

Pedro Augusto Teixeira de Oliveira<sup>1</sup>; Camila Batista da Silva Lopes<sup>2</sup>; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro<sup>1</sup>; Dandara Paula da Silva Guimarães<sup>1</sup>; Davi Pimenta Fialho<sup>1</sup>; João Gilberto Meza Ucella Filho<sup>1</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](mailto:lapem@ufv.br)

**Resumo:** Durante a carbonização, gases condensáveis e não condensáveis, são produzidos e comumente lançados à atmosfera, afetando o meio ambiente. A recuperação dos gases condensáveis, visando obtenção do extrato pirolenhoso, é uma estratégia adotada para minimizar os problemas ambientais. Desse modo, este trabalho teve por objetivo avaliar a produção do extrato pirolenhoso, considerando diferentes faixas de temperatura dos gases da carbonização de *Corymbia citriodora* x *torelliana*, em um sistema fornos-fornalha adaptado para condensação de gases. Foi desenvolvido um recuperador, para monitorar a temperatura dos gases. O extrato foi coletado em três faixas de temperatura (65-85°C, 85-150°C e 150-170°C). Observou-se que as faixas de coleta nas temperaturas entre 65-85°C e 150-170°C apresentaram baixa geração de extrato pirolenhoso, enquanto entre 85-150°C foi responsável pelo maior rendimento deste subproduto. Conclui-se que o recuperador apresentou eficácia na coleta do extrato pirolenhoso, promovendo uma redução significativa das emissões gasosas da carbonização e podendo ainda ser rentável.

**Palavras-chave:** Recuperador; Gases condensáveis; Sustentabilidade

**The effect of gas temperature on the carbonization of *Corymbia* sp. on the yield of pyroligneous extract.**

**Abstract:** During carbonization, condensable and non-condensable gases are produced and commonly released into the atmosphere, affecting the environment. The recovery of condensable gases, aiming to obtain pyroligneous acid, is a strategy adopted to minimize environmental problems. Thus, this study aimed to evaluate the production of pyroligneous acid, considering different temperature ranges of gases from the carbonization of *Corymbia citriodora* x *torelliana*, in a furnace-furnace system adapted for gas condensation. A recuperator was developed to monitor the temperature of the gases. The extract was collected in three temperature ranges (65-85°C, 85-150°C, and 150-170°C). It was observed that the collection ranges at temperatures between 65-85°C and 150-170°C showed low generation of pyroligneous acid, while between 85-150°C was responsible for the highest yield of this byproduct. It is concluded that the recuperator showed effectiveness in collecting pyroligneous acid, promoting a significant reduction in gas emissions from carbonization and could also be profitable.

**Keywords:** Recuperator; Condensable gases; Sustainability.

## 1. INTRODUÇÃO

A carbonização, também conhecida como pirólise lenta da madeira, consiste na transformação termoquímica da madeira em carvão vegetal (Pecha; Garcia-Perez, 2020). Este processo é dividido em quatro fases: inicialmente, a primeira fase consiste na secagem da madeira a uma temperatura em torno de 200°C; em seguida, na segunda fase, ocorre a degradação das hemiceluloses, que se dá entre 200 e 270°C; a terceira fase corresponde a decomposição da celulose, ocorrendo entre 270 e 315°C; por fim, na quarta e última fase, ocorre a fixação do carbono e polimerização do carvão, entre 315 e 400°C (Damasio et al., 2015; Jesus, 2020). Além do produto sólido resultante, durante o processo, também são produzidos gases condensáveis e gases não condensáveis.

Atualmente, a maior parte da produção de carvão vegetal no Brasil provém de médios e pequenos produtores, os quais têm um baixo nível tecnológico de produção, com a utilização de fornos rudimentares, gerando um menor rendimento de carvão vegetal e um descontrole nas emissões de gases à atmosfera, sendo esta prejudicial a salubridade das unidades produtoras e do ambiente ao entorno (Oliveira et al., 2013). Portanto, torna-se necessário buscar formas para uma produção mais sustentável, visando minimizar os impactos ao meio ambiente. Nesse contexto, a recuperação dos gases condensáveis apresenta-se como alternativa promissora.

Os gases condensáveis podem ser divididos em duas partes: alcatrão insolúvel e extrato pirolenhoso. O alcatrão insolúvel apresenta coloração preta, com textura oleosa e insolúvel em água. Enquanto o extrato pirolenhoso, ou também chamado de vinagre da madeira, ácido pirolenhoso e líquido pirolenhoso, corresponde a parte aquosa, sendo produto composto com diferentes tipos de substâncias químicas formadas a partir da degradação da madeira. Esta complexa estrutura, com mais de 200 compostos químicos já identificados (Wu et al., 2015), pode variar em função da temperatura a qual são submetidos os gases (Cheng et al., 2021).

A composição química complexa do extrato pirolenhoso vem chamando bastante a atenção e despertando grandes interesses por parte das empresas, por poder ser um produto com aplicabilidade para desenvolvimento de produtos diversos, como fertilizantes (Cândido et al., 2023) e fármacos (Ucella-Filho et al.,

2024). Com isso, além de tornar a produção mais sustentável, pode agregar valor à atividade, gerando uma nova fonte de renda aos produtores rurais (Wang et al., 2020).

Desse modo, este trabalho teve por objetivo avaliar a produção de extrato pirolenhoso, considerando diferentes faixas de temperatura dos gases da carbonização de *Corymbia citriodora x torelliana*, em um sistema fornos-fornalha adaptado para condensação de gases.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais. Para o experimento utilizou-se madeira de *Corymbia citriodora x torelliana* (clone AEC043), aos 7 anos, provenientes de plantio localizado no município de Bom Despacho, Minas Gerais, com espaçamentos 4 x 1,87 m e incremento médio anual de 35 m<sup>3</sup>/ha/ano, com casca. Para a realização da carbonização e recuperação do extrato pirolenhoso, foi utilizado um forno do sistema fornos-fornalha, que consiste em um conjunto de quatro fornos circulares, com capacidade volumétrica de 1,0 m<sup>3</sup> de madeira, interligados por meio de dutos a um queimador de gases central (fornalha). Antes de cada processo de carbonização para coleta do extrato pirolenhoso, determinou-se o teor de umidade, base seca, da madeira enforada.

Ao sistema fornos-fornalha foi adaptado um mecanismo de condensação de gases para extração e coleta do extrato pirolenhoso, sendo este sistema composto por uma tubulação metálica interligada a uma tubulação em PVC, formando o recuperador, hastes de sustentação, coletor e um sistema para controle de temperatura. O aparelho foi acoplado na parte lateral da chaminé, fazendo com que os gases saíssem pela tubulação. Devido ao grande comprimento do recuperador, durante o percurso, os gases perdiam temperatura para o meio externo, promovendo a liquefação de toda fração condensável dos gases. Dessa forma, por meio da ação da gravidade e inclinação do tubo, o extrato gerado escorria e caía dentro do coletor, como mostrado na Figura 1.

Com a determinação prévia das massas de extrato pirolenhoso, carvão vegetal, atíços e finos, foi possível calcular o rendimento individual de cada um, por meio da equação de rendimento gravimétrico.

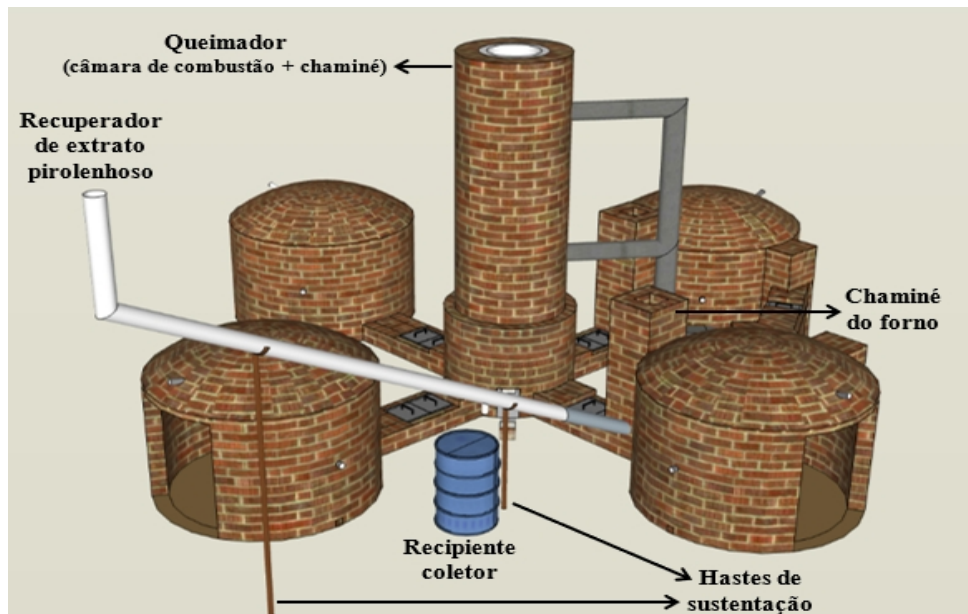
Em que:

$RG_x$  = rendimento gravimétrico da variável em questão (%);

$M_x$  = massa da variável analisada (kg);

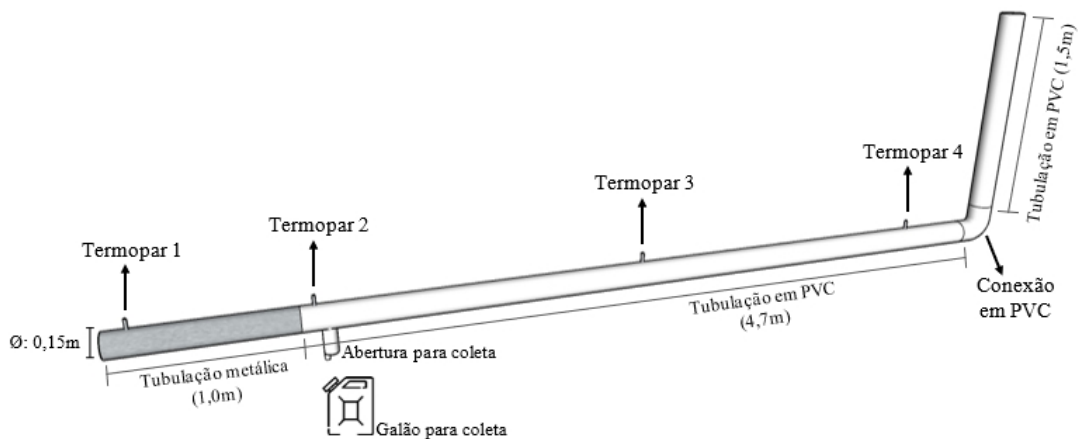
$M_{MS}$  = massa de madeira seca (kg).

**Figura 1.** Esquema do Sistema Fornos-Fornalha como o recuperador de extrato pirolenhoso.



O monitoramento da temperatura de saída dos gases foi realizado a partir de quatro termopares tipo “K”, inseridos em tubos metálicos que foram acoplados ao longo do recuperador a 12 cm, 1,2 m., 3,2 m e 5,2 m de distância em relação ao início da tubulação (Figura 2). A extração dos gases foi iniciada a partir do momento que o termopar, localizado no duto que liga o forno ao queimador de gases do sistema fornos-fornalha, registrou temperatura igual a 65°C, evitando, assim, a coleta de maior quantidade de água, visto que a primeira etapa da carbonização é a secagem da madeira. Ao atingir 65°C, o fluxo de gases para o queimador foi interrompido, o recuperador foi devidamente acoplado na lateral da chaminé e a saída dos gases da carbonização passou a ser pela tubulação de recuperação do extrato pirolenhoso.

**Figura 2.** Representação do Recuperador de extrato pirolenhoso.



A coleta do extrato pirolenhoso foi realizada, tomando como base a temperatura do termopar a 12 cm do início do recuperador, em três faixas de temperaturas: 65-85°C, 85-150°C e 150-170°C. Quando a temperatura dos gases atingiu valor maior que 170°C, a coleta foi interrompida, o recuperador foi tirado, o fluxo de gases voltou a ser em direção ao queimador e a carbonização seguiu normalmente. Os galões contendo o extrato coletado, foram deixados em repouso por seis meses em ambiente protegido da luz e após esse período foram coletadas amostras do sobrenadante de cada tratamento e realizado a caracterização do extrato pirolenhoso. O delineamento foi inteiramente casualizado com três tratamentos (faixas de temperaturas), em três repetições (carbonizações).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A madeira de *Corymbia citriodora x torelliana* apresentou teor de umidade variando de 23-27%, tendo a primeira fase da pirólise, ou seja, a secagem, um tempo de dez horas. A temperatura de 65°C na saída do forno, foi alcançada após aproximadamente quatro horas após a ignição.

O tempo de coleta do extrato pirolenhoso na faixa de 65-85°C ocorreu durante seis horas, após esse período, quando a temperatura dos gases já ultrapassava os 85°C, foi dado início a segunda faixa de coleta, 85-150°C. Esta nova faixa de temperatura durou 12 h, sendo a mais representativa e com maior quantidade de extrato pirolenhoso recuperado. A última fase (150-170°C) teve duração de 2h, esse tempo é justificado devido ao incremento da temperatura dos gases na saída do forno acima da faixa estabelecida. Na Tabela 1 são apresentados

os valores médios dos parâmetros do extrato pirolenhoso em função dos tratamentos.

**Tabela 1.** Média dos valores do extrato pirolenhoso, em função das faixas de temperatura dos gases da carbonização

Parâmetro	Tabela dos gases (°C)			Total
	60 – 85	85 – 150	150 – 170	
Volume de EP (L)	10,5	18,5	0,9	29,8
Massa de EP (kg)	10,0	19,01	0,9	30,1
Rendimento gravimétrico em EP (%)	2,8	5,4	0,3	8,5
Temperatura da copa do forno (°C)	195	302,8	372,5	-

\*EP: Extrato pirolenhoso.

Na Tabela 2 são apresentados os rendimentos gravimétricos dos produtos da carbonização da madeira.

**Tabela 2.** Valores médios dos rendimentos dos produtos da carbonização da madeira

Carvão Vegetal (%)	Atiço (%)	Finos (%)
28,26%	0,28%	2,10%
101,0kg	1,0kg	7,5kg

O rendimento gravimétrico total em extrato pirolenhoso (8,5%) foi semelhante ao encontrado na literatura para a produção de extrato pirolenhoso a partir de madeira de eucalipto (Machado et al. 2013), ao avaliarem o desempenho de uma unidade carbonizadora com recuperação de extrato pirolenhoso, obtiveram rendimento máximo de 7,0% em extrato e rendimento em carvão vegetal de 23,0%.

A maior produção de extrato pirolenhoso na segunda faixa de temperatura (85-150°C) está diretamente ligada às fases de carbonização que ocorrem nesse intervalo. Nesse ponto, as temperaturas dentro do forno são maiores, o que

promove uma maior decomposição dos componentes químicos da madeira, principalmente hemicelulose e celulose, levando a uma maior produção de mistura de hidrocarbonetos e compostos oxigenados, lineares ou cíclicos (Suarez et al., 2007), acarretando uma elevada emissão de gases não condensáveis e condensáveis e gerando uma maior coleta de extrato pirolenhoso (5,4%). Por outro lado, na primeira faixa de temperatura ocorre, principalmente, a secagem da madeira, liberando água durante a carbonização (2,8%). Enquanto na última faixa, ocorre uma degradação parcial da lignina e uma diminuição do conteúdo de material volátil (0,3%).

#### **4. CONCLUSÃO**

O recuperador e todo sistema utilizado, mostrou-se bastante eficiente, obtendo rendimentos em extrato semelhantes aos observados na literatura, para sistemas similares, com destaque para a coleta na faixa de 85 a 150°C, na qual se obteve maior produtividade, devido a sua relação com a segunda e terceira fase da carbonização, fases estas que promovem um alto grau de desagregação dos componentes químicos da madeira, acarretando, assim, uma elevada emissão de gases não condensáveis e condensáveis. O recuperador de extrato pirolenhoso apresentou eficácia na diminuição da emissão de gases. Além disso, seu custo de implementação é baixo, o que permite acesso aos pequenos e médios produtores de carvão vegetal. Dessa forma, além de contribuir com o meio ambiente, a recuperação do extrato pode vir a ser uma fonte de renda para esses produtores, através da sua comercialização.

#### **5. AGRADECIMENTOS**

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 (SIF) e a EMBRAP II Unidade Fibras Florestais.

## 6. REFERÊNCIAS

- CANAL, W. D.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O. et al. Efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases de efeito estufa no processo de carbonização. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 112, p. 831-840, 2016.
- CÂNDIDO, N. R.; PASA, V. M. D.; OLIVEIRA, V. A. et al. Understanding the multifunctionality of pyrolygneous acid from waste biomass and the potential applications in agriculture. **Science of The Total Environment**, v. 881, p. 163519, 2023.
- CHENG, J.; HU, S. C.; KANG, K. et al. The effects of pyrolysis temperature and storage time on the compositions and properties of the pyrolygneous acids generated from cotton stalk based on a polygeneration process. **Industrial Crops and Products**, v. 161, p. 113226, 2021.
- DAMASIO, R. A. P.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O. et al. Perfil térmico e controle da carbonização em forno circular por meio da temperatura interna. **Ciência da Madeira**, v. 6; n. 1, p. 11-22, 2015.
- MACHADO, G. H. L.; LUCHI, I. F.; BISSI, L. B. et al. Montagem e caracterização de um forno piloto para a produção e recuperação do extrato pirolenhoso proveniente da carbonização da madeira. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 6, p. 2930-2941, 2013.
- OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O; PEREIRA, B. L. C. et al. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, v. 37, p. 557-566, 2013.
- 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.
- SUAREZ, P. A. Z.; MENEGHETTI, S. M. P; MENEGHETTI, M. R. et al. Transformação de triglicerídeos em combustíveis materiais poliméricos e insumos químicos: algumas aplicações da catálise na oleoquímica. **Química Nova**, v. 30, n. 3, 667-676, 2007.
- UCELLA-FILHO, J. G. M., FERREIRA, N. S., CUPERTINO, G. F. M. et al. Antiviral potential of bio-oil from *Citrus sinensis* waste wood as a therapeutic approach against COVID-19. **Journal of Cleaner Production**, v. 447, p. 141583, 2024.
- WANG, C.; ZHANG, S.; WU, S. et al. Multi-purpose production with valorization of wood vinegar and briquette fuels from wood sawdust by hydrothermal process. **Fuel**, v. 282, 9p., 2020.
- WU, Q.; ZHANG, S.; HOU, B. et al. Study on the preparation of wood vinegar from biomass residues by carbonization process. **Bioresource Technology**, v. 179, p.



98-103, 2015.



Engenharia  
Industrial  
Madeireira



SOCIEDADE BRASILEIRA  
DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DA MADEIRA