

Pirólise da madeira de eucalipto: rendimentos e recuperação de gases condensáveis

Joana D'arc Rocha de Oliveira¹; Tauana de Souza Mangini²; Talita Baldin¹; Marina Donaria Chaves Arantes¹; Rômulo Trevisan³

¹Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Montes Claros/MG, Brasil; ²Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná (UFPY), Curitiba/PR, Brasil; ³Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen/RS, Brasil – tauananamangini@yahoo.com

Resumo: O objetivo desta pesquisa foi avaliar o rendimento do processo de pirólise da madeira de *Eucalyptus spp.* com recuperação dos gases condensáveis. A pirólise lenta foi conduzida em forno mufla com condensador em sistema água ou fluído (60% monoetilenoglicol + 40% água) e foram verificados rendimentos de carvão vegetal, co-produto (licor pirolenhoso) e gases residuais. Os tratamentos consistiram em 3 temperaturas finais de carbonização, com 3 taxas de aquecimento. O melhor rendimento gravimétrico foi de 50,4%, com taxa de aquecimento $1,5\text{ }(\text{°C}.\text{min}^{-1})$ até temperatura final de $360\text{ }^{\circ}\text{C}$, no condensador sistema água, recuperando 29,5% em licor pirolenhoso, destacando-se também pela menor emissão de poluentes 20,1% de gases não-condensáveis. Portanto, conclui-se que, a taxa de aquecimento, aliada a menor temperatura final, resultam no melhor rendimento em carvão vegetal principalmente para a espécie em questão e que, o método utilizado permite a formulação de melhorias direcionadas à otimização do processo.

Palavras-chave: Termoconversão. Carvão Vegetal. Rendimento Gravimétrico.

Pyrolysis of *Eucalyptus* wood: yields and recovery of condensable gases

Abstract: The objective of this research was to evaluate the yield of the pyrolysis process of *Eucalyptus spp.* wood with recovery of condensable gases. Slow pyrolysis was conducted in a muffle furnace with a condenser in a water or fluid system (60% monoethylene glycol + 40% water) and yields of charcoal, co-product (pyroligneous liquor) and residual gases were verified. The treatments consisted of 3 final carbonization temperatures, with 3 heating rates. The best gravimetric yield was 50.4%, with a heating rate of $1.5\text{ }(\text{°C}.\text{min}^{-1})$ up to a final temperature of $360\text{ }^{\circ}\text{C}$, in the water system condenser, recovering 29.5% in pyroligneous liquor, also standing out for the lowest emission of pollutants 20.1% of non-condensable gases. Therefore, it is concluded that the heating rate, combined with the lower final temperature, results in the best charcoal yield, especially for the species in question, and that the method used allows the formulation of improvements aimed at optimizing the process.

Keywords: Thermoconversion. Charcoal. Gravimetric Yield.

1. INTRODUÇÃO



A ampliação e o domínio da pirólise da madeira tornaram o Brasil líder mundial na produção e uso de carvão vegetal para fins industriais, explicada pela demanda siderúrgica e metalúrgica, substituição do carvão mineral e capacidade nacional de produção diversificada de biomassa florestal (Ramos *et al.*, 2019). A cadeia produtiva de carvão vegetal ganhou impulso governamental e de empresas siderúrgicas, com investimentos em pesquisas florestais do gênero *Eucalyptus*, madeira de reflorestamento e uso energético (Rodrigues; Junior, 2019).

A expansão de novas tecnologias e oportunidades na transformação da biomassa florestal em produtos energéticos, propõe o aprimoramento na geração de bioproductos e ou aproveitamento de co-produtos da carbonização (Kan *et al.*, 2016; Zhu *et al.*, 2021). No contexto de produção de carvão vegetal para uso industrial, Donato *et al.* (2017), afirmaram viabilidade econômica em fornos retangulares e metálicos, diferentes do convencional de alvenaria. Fortaleza *et al.* (2019), observaram viabilidade técnica no uso de resíduos de biomassas de *Eucalyptus spp.* com diferentes características comerciais. Compactuando na busca por qualidade, competitividade tecnológica e sustentabilidade nas cadeias produtivas florestais.

Na termoconversão da madeira do gênero *Eucalyptus* em carvão vegetal, os parâmetros de temperatura final, taxa de aquecimento e tempo de permanência no forno são cruciais na obtenção de um produto de qualidade. Segundo Couto *et al.* (2015) a temperatura da carbonização exerce maior influência nas propriedades físicas do carvão do que a taxa de aquecimento.

Pesquisas e desenvolvimentos relacionados ao tema da modernização da produção de carvão vegetal, enfatizam formas mais efetivas de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) no parque industrial, através da melhoria da eficiência da carbonização, entendida por rendimento gravimétrico do processo (IBÁ, 2022). Em geral, a produção de carvão com recuperação de gases condensáveis, produz cerca de 33,0% de carvão vegetal, 35,0% de licor pirolenhoso (LP), 6,5% de alcatrão vegetal e 25,0% resíduos de gases não condensáveis, com reduções de potenciais fontes de emissão de poluentes GEE (Kan *et al.*, 2016).

Ambientalmente a pirólise lenta em fornos tradicionais emite quantidades consideráveis prejudiciais de GEE. Enquanto, Loureiro *et al.* (2021) evidenciaram que o controle da carbonização, aumentou o rendimento com recuperação de gases do processo emitindo pouco GEE, sem interferência na qualidade do carvão vegetal.



Desta forma, conduzir a carbonização superando rendimentos em carvão vegetal aliada à recuperação dos gases exige tecnologia de fornos adaptados, ajuste de parâmetros, controle operacional e ambiental. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o rendimento do processo de pirólise da madeira de *Eucalyptus spp.* com recuperação dos gases condensáveis.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Ensaio experimental

O experimento foi realizado no Laboratório de Tratamento de Resíduos da Universidade Federal de Minas Gerais, Campus Regional Montes Claros. Na amostragem, foram usadas madeira de eucalipto (*Eucalyptus spp.*) de um plantio localizado no distrito Nova Esperança do município de Montes Claros, Minas Gerais. Foram retirados três discos com 4 cm de espessura compondo amostras em cunhas.

Para avaliação das características da madeira, foram determinadas a densidade básica (Db) usando os procedimentos da norma NBR-11941 (ABNT, 2003). A umidade da madeira e do carvão vegetal foram obtidos, com adaptação da norma NBR-14929 (ABNT, 2003).

Foi testado a produção do carvão vegetal usando um forno mufla, de reator retangular com cápsula ajustada medindo 450 mm de comprimento por 170 mm de altura e avaliada a influência do condensador com sistema distinto de líquidos: a) água; b) fluído (60% monoetilenoglicol + 40% água).

Adotou-se o método de produção de carvão com presença de oxigênio controlado e recuperação dos gases condensáveis da carbonização. As carbonizações foram realizadas nos parâmetros apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Parâmetros do processo de pirólise da madeira de *Eucalyptus spp.*, na carbonização com recuperação de gases condensáveis.

Taxa de Aquecimento (°C.min ⁻¹)	Temperatura (°C)							Residência
	160	210	260	310	360	410	460	
1,0	1h	1h	1h30	1h30	1h	-	-	6h
	1h	1h	1h30	1h30	1h	50min	-	6h50min
	1h	1h	1h30	1h30	1h	50min	50min	7h40min
1,25	1h	1h	1h30	1h20	30min	-	-	5h20min



	1h	1h	1h30	1h30	30min	35min	-	6h05min
	1h	1h	1h30	1h	1h	35min	35min	6h40min
1,5	1h	1h	1h30	15min	15min	-	-	4h
	1h	1h	1h30	30min	15min	15min	-	4h30min
	1h	1h	1h30	1h	30min	30min	40min	6h10min

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

Após as carbonizações, foram determinados os rendimentos de carvão vegetal (CV), licor pirolenhoso (LP) e gases não-condensáveis (GNC), de acordo com Oliveira *et al.*, (2010), nas respectivas equações 1, 2 e 3.

$$RCV = \frac{MScv}{MSmad} \times 100 \quad (1)$$

$$RLP = \frac{Mlp}{MSmad} \times 100 \quad (2)$$

$$RGNC = 100 - (RCV + RLP) \quad (3)$$

Em que, RCV rendimento gravimétrico de carvão (%); RLP rendimento em licor pirolenhoso (%); RGNC rendimento em gases não-condensáveis (%); MScv massa seca do carvão vegetal (g); MSmad massa seca da madeira (g) e Mlp massa do LP em (g).

Para caracterizar a qualidade do carvão, foram realizadas análises imediatas de acordo com a norma NBR-8112 (ABNT, 1986), na determinação de teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF).

A análise estatística foi processada com base no Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). Os tratamentos consistiram em 3 temperaturas finais de carbonização, com 3 taxas de aquecimento do forno e 2 líquidos distintos no sistema do condensador, totalizando 54 avaliações. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), teste de normalidade Shapiro-Wilk e teste de homogeneidade Bartlett, ao nível de 5% de significância, com o uso do software Rstudio, versão 4.2.0.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A cápsula retangular permitiu o uso operacional do volume útil da capacidade do forno mufla, reduzindo espaços vazios, sendo mais indicada quando comparada as cápsulas cilíndricas testadas por Oliveira *et al.*, (2010) e Rodrigues e Junior (2019). O uso dos distintos líquido no condensador diferenciaram nos rendimentos, sendo a



água mais indicado tecnicamente, ambientalmente e economicamente. Os dados referentes aos rendimentos do processo de pirólise estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Rendimentos em carvão vegetal, licor pirolenhoso e gases não condensáveis da carbonização da madeira de *Eucalyptus* spp., via pirólise lenta no forno mufla com um condensador para recuperação dos gases.

PARÂMETROS		CONDENSADOR	PRODUTO	CO-PRODUTO	RESÍDUO
TF (°C)	TA (°C min ⁻¹)	SISTEMA	RCV	RLP	RGNC
360	1	ÁGUA	38,4%	36,1%	25,5%
		FLUÍDO	34,5%	31,4%	34,1%
	1,25	ÁGUA	36,1%	38,3%	25,6%
		FLUÍDO	27,7%	36,7%	35,6%
	1,5	ÁGUA	50,4%	29,5%	20,1%
		FLUÍDO	31,1%	34,6%	34,3%
	410	ÁGUA	32,6%	38,2%	29,2%
		FLUÍDO	30,8%	44,6%	24,6%
460	1	ÁGUA	34,2%	32,9%	32,9%
		FLUÍDO	33,3%	34,7%	32,0%
	1,25	ÁGUA	36,0%	36,6%	27,4%
		FLUÍDO	33,2%	28,8%	38,0%
	1,5	ÁGUA	29,4%	39,8%	30,8%
		FLUÍDO	31,8%	35,0%	33,2%
	1,25	ÁGUA	31,0%	34,9%	34,1%
		FLUÍDO	31,1%	40,3%	28,6%
	1,5	ÁGUA	31,3%	45,1%	23,6%
		FLUÍDO	28,5%	41,0%	30,5%

Legenda: TF Temperatura final; TA Taxa de aquecimento; SISTEMA tipo de líquido usado no condensador; RCV rendimento gravimétrico de carvão; RLP rendimento em licor pirolenhoso; RGNC rendimento em gases não-condensáveis.

O maior rendimento gravimétrico alcançou 50,4% e teve a menor emissão de GNC 20,1%, na taxa de aquecimento de 1,5°C.min⁻¹ e temperatura final até 360°C, no sistema água. Isto é, 5% menos poluentes liberados na atmosfera e rendimento gravimétrico 17% a mais, em média do observado por Kan *et al.*, (2016).

Sob 460°C os rendimentos em CV diminuíram, produzindo mais LP e GNC. O mais alto RLP foi 45%, com 31,3% de RCV e 23,6% GNC na taxa de aquecimento de 1,5 °C.min⁻¹, sistema água. Este balanceamento é relativo à alta temperatura e volatilização na combustão incompleta da madeira (Zhu *et al.*, 2021).

Estatisticamente, em média os valores de rendimentos diferenciaram por tratamento, foram obtidos dados e processados, apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Análise de variância das médias dos tratamentos.

ANOVA	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Treatment	8	701.4	87.67	4.866	0.00256 *
Residuals	18	324.3	18.02		

--- Signif. codes*: $\alpha = 0,05$ ou 5%.

De acordo com o nível de significância à 5%, os resíduos tiveram distribuição normal e as variâncias foram homogêneas, conforme os testes Shapiro-Wilk e Bartlett.

No melhor resultado do RCV, a umidade foi de 5,19% na taxa de aquecimento de $1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$ até 360°C , sistema água, conforme apresentado na Tabela 3. Dentre os indicadores de qualidade do carvão vegetal a umidade é a principal em diversos processos, limitada em até 10%, para garantir a eficiência da combustão. Além disso, a umidade interfere negativamente na densidade aparente do carvão aumentando a porosidade (Meshchanin *et al.*, 2021).

Tabela 3. Análise imediata do carvão da madeira de *Eucalyptus spp.*, produzido via pirólise lenta e recuperação de gases.

TF ($^{\circ}\text{C}$)	TA ($^{\circ}\text{C}/\text{min}^{-1}$)	SISTEMA	U (%)	TMV (%)	TCz (%)	TCF (%)
360	1,25	ÁGUA	7,67	27,1	1,47	71,5
		FLUÍDO	8,71	25,4	1,37	73,0
		ÁGUA	6,92	28,1	2,01	69,9
		FLUÍDO	6,76	28,2	1,37	64,6
	1,5	ÁGUA	5,19	34,2	2,34	63,4
		FLUÍDO	4,57	25,4	0,48	74,1
		ÁGUA	5,14	23,4	2,33	74,2
		FLUÍDO	5,31	22,8	2,12	75,0
410	1,25	ÁGUA	4,84	22,3	2,67	75,1
		FLUÍDO	7,50	25,1	2,56	70,1
		ÁGUA	6,72	30,8	1,49	67,7
		FLUÍDO	7,80	23,3	1,42	75,3
	1,5	ÁGUA	5,18	12,7	1,23	86,1
		FLUÍDO	3,60	12,7	1,14	86,2
		ÁGUA	5,49	15,8	1,17	83,0
		FLUÍDO	5,62	14,1	1,94	83,9
460	1,25	ÁGUA	3,63	17,9	1,57	80,5
		FLUÍDO	6,00	17,1	1,03	81,9

LEGENDA: Temperatura Final (TF); Taxa de Aquecimento (TA); Condensador com o sistema de resfriamento (SISTEMA); Umidade (U); Teor de Material Volátil (TMV); Teor de Cinzas (TCz); Teor de Carbono Fixo (TCF).



O MV reduziu com o aumento da temperatura final de carbonização. Os melhores resultados foram apresentados sob 460 °C. Couto *et al.* (2015) e Dufourny *et al.* (2019), também constataram em seus estudos esta relação inversa. Porém, na taxa de aquecimento 1,0 °C.min⁻¹, o TMV foi o mais baixo entre os tratamentos. Para as cinzas os resultados foram abaixo de 3%, requerido para uso na siderurgia. O elevado TCz diminui a resistência do ferro gusa (Protásio *et al.*, 2021).

A taxa de aquecimento de 1,0 °C.min⁻¹ refletiu na qualidade do carvão vegetal, com teor de carbono fixo entre de 71,5% e 86,2%, nas temperaturas finais avaliadas. Em geral, o CF aumenta com o aumento da temperatura (Protásio *et al.*, 2021). Entretanto, os parâmetros neste estudo, mostraram também uma relação de eficiência obtida sob taxas de aquecimento, além, da temperatura final.

4. CONCLUSÃO

Neste estudo, a maior taxa de aquecimento, aliada a menor temperatura final, resultaram no melhor rendimento em carvão vegetal. Isso torna mais rentável a produção de carvão vegetal com recuperação de gases.

A recuperação de gases, no condensador sistema água e o controle dos parâmetros de carbonização, permitem a formulação de melhorias direcionadas à otimização do processo, com eficiência, geração de bioproductos e sustentabilidade ambiental.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR-8112**: Carvão Vegetal – Análise Imediata. Rio de Janeiro : ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR-11941**: Determinação da densidade básica em madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR-14929**: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A. N.; *et al.* Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 817-831, 2015. Disponível em: dx.doi.org/10.18671/scifor.v43n108.7. Acesso em 18, abr, 2024.



DONATO, D. B.; MAGALHÃES, M. A.; CARNEIRO, A. C. O.; et al. Viabilidade econômica de diferentes sistemas de produção de carvão vegetal em escala industrial. **Ciência da Madeira.** 8(3): 143-149, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n3p143-149>. Acesso em 18, abr. 2024.

DUFOURNY, A.; VAN DE STEENE, L.; HUMBERT, G.; et al. Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, volume 137, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaat.2018.10.013>. Acesso em 18, abr. 2024.

FORTALEZA, A. P.; NASCIMENTO FILHO, J. J. P.; CERETTA, R. P. S.; et al. Biomassa de espécies florestais para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 29, n. 3, p. 1436-1451, Sept. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509831639>. Acesso em 18, abr. 2024.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual**. 93p. 2023

KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. (2016) Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V. 57, N. 1, Pag. 1126-1140, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>. Acesso em 18, abr. 2024.

LOUREIRO, A. B.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A. et al. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia spp.* para uso industrial. **Ciência Florestal**. v. 31, n. 1, p. 214-232, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509836120>. Acesso em 18, abr. 2024.

MESHCHANIN, V. I.; LYSENKO, L. A.; MIROSHNICHENKO, D. V.; et al. The humidity of coals (review). **Uglehimičeskij žurnal**, 2021. Disponível em: [https://www.semanticscholar.org/paper/THE-HUMIDITY-OF-COALS-\(REVIEW\)-MeshchaninV.-LysenkoL./ebfeaf4fda56563c5b85acb0f9957beea39393b8](https://www.semanticscholar.org/paper/THE-HUMIDITY-OF-COALS-(REVIEW)-MeshchaninV.-LysenkoL./ebfeaf4fda56563c5b85acb0f9957beea39393b8). Acesso em 18, abr. 2024.

OLIVEIRA, A. C., CARNEIRO, A. D. C., VITAL, B. R.; et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, 38(87), 431-439. 2010. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr87/cap10.pdf>. Acesso em 18, abr. 2024.

PROTÁSIO, T.; LIMA M. D. R.; SCATOLINO M. V.; et al. Parâmetros de produtividade e qualidade de carvão vegetal para classificação confiável de clones de eucalipto de florestas energéticas brasileiras. **Renovar Energia**. 164:34–45. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-energy/vol/164/suppl/C>. Acesso em 18, abr. 2024.

RAMOS, D. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TANGSTAD, M.; et al. Quality of Wood and Charcoal from *Eucalyptus* Clones for Metallurgical Use. **Floresta Ambiente**. Seropédica, v. 26, n. spe2, e20180435, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.043518>. Acesso em 18, abr. 2024.

RODRIGUES, T.; JUNIOR, A. B.; Charcoal: A discussion on carbonization kilns. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**, v. 143, n.104670, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaat.2019.104670>. Acesso em 18, abr. 2024.



VICBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência
e Tecnologia da Madeira
P E L O T A S 2 0 2 4

TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIECKOW, J.; *et al.* Biocarvão: Realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**. v. 28, n. 2, abr./jun. 2018. p. 875-887. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509832128>. Acesso em 18, abr. 2024.

ZHU, K.; GU, S.; LIU, J.; *et al.* Wood Vinegar as a Complex Growth Regulator Promotes the Growth, Yield, and Quality of Rapeseed. **Agronomy** 11, 510. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11030510>. Acesso em 18, abr. 2024.

