

Comportamento térmico e emissão de gases condensáveis e não condensáveis no processo de carbonização da madeira

Wagner Davel Canal^{1*}, Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho¹, Aylson Costa Oliveira², Mateus Alves de Magalhães¹, Welliton Leis Cândido¹, Lucas de Freitas Fialho¹

¹Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs, s/n, CEP 36570-900, Viçosa, MG, Brasil

²Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367, CEP 78060-900, Cuiabá, MT, Brasil

*Autor correspondente:
wagner.d.canal@gmail.com

Termos para indexação:

Degradação térmica
Carvão vegetal
Eucalyptus

Index terms:

Thermal degradation
Charcoal
Eucalyptus

Histórico do artigo:

Recebido em 16/10/2015
Aprovado em 15/08/2016
Publicado em 30/09/2016

doi: 10.4336/2016.pfb.36.87.1083

Resumo - O objetivo do presente estudo foi avaliar o comportamento térmico e a emissão de gases durante o processo de produção de carvão vegetal a partir de madeira de *Eucalyptus* spp., com aproximadamente 7 anos de idade. As amostras foram procedentes de um teste clonal de uma empresa florestal, localizada em Divinésia, MG. Realizou-se análise termogravimétrica da madeira (TG/DTG) e carbonizações em mufla, para se determinar o comportamento médio das emissões de gases condensáveis e não condensáveis. A degradação térmica da madeira seguiu comportamento inverso às emissões de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), hidrogênio (H₂) e de líquido condensável, passando por um ponto mínimo de degradação e máximo de emissões em temperaturas próximas de 300 °C e 350 °C, respectivamente. Durante o processo de carbonização foram observados três comportamentos distintos: secagem da madeira até temperaturas próximas a 200 °C; picos máximos de emissão dos gases CO₂, CO e licor pirolenhoso na faixa de temperatura que corresponde a 300 °C e 450 °C; e incrementos dos gases CH₄ e H₂ de acordo com aumentos em temperatura a partir de 300 °C.

Thermal behavior and emission of condensable and non-condensable gases in the process of wood carbonization

Abstract - The main objective of this study was to evaluate wood thermal degradation and the release of condensable and non-condensable gases during charcoal production from *Eucalyptus* spp. with approximately seven years old. The wood samples were from a clonal test of a forest company from Divinésia, Minas Gerais State, Brazil. Thermogravimetric analysis (TGA/DTA) and carbonizations in muffle were carried out to determine the wood thermal performance and emission factor of non-condensable and condensable gases. Wood thermal degradation presented opposite performance of carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), methane (CH₄), hydrogen (H₂) and condensable gases, presenting a minimum of degradation point and maximum emission at temperatures of 300 °C and 350 °C, respectively. During carbonization process it was observed three distinct behaviors: drying the wood in temperatures near 200 °C; maximum peak emission of CO₂, CO and pyrolytic in temperature range corresponding to 300 °C and 450 °C; and CH₄ and H₂ gases increases according to temperature increases from 300 °C.

Introdução

O processo de carbonização da madeira objetiva a concentração de carbono no volume disponível, com a eliminação dos elementos voláteis, visando não somente sua transformação em carvão vegetal como

também seu alto desempenho e eficiência energética. Segundo Carneiro et al. (2013b), esse processo consiste no aquecimento da madeira a temperaturas entre 350 °C e 500 °C com ausência ou presença controlada de oxigênio, promovendo modificações em seus componentes. Essa técnica está intimamente relacionada

à composição química dos três principais componentes da madeira: celulose, hemiceluloses e lignina, além de sofrer influência das características físicas e anatômicas, que garantem grande parte da resistência térmica da madeira (Oliveira et al., 2010).

É possível obter diferentes faixas de degradação pelo processo de carbonização, uma vez que os constituintes químicos da madeira possuem diversas ligações e inúmeros grupamentos funcionais, resultando, conseqüentemente, em distintos comportamentos térmicos de acordo com os incrementos em temperatura (Yang et al., 2007). Desse modo, a interpretação das etapas das emissões gasosas torna-se de grande importância a fim de mitigar os efeitos adversos dessa produção sobre a qualidade ambiental.

De modo geral, a carbonização da madeira determina perdas de frações na forma de vapor de água, alcatrões, metano, monóxido de carbono, entre outros compostos, uma vez que a ação do calor tem como intuito eliminar a maior parte dos componentes voláteis da madeira, as quais podem provocar sérios problemas ambientais (Andrade & Carvalho, 1998; Klose et al., 2000; Carneiro et al., 2013a).

No Brasil, país com grande potencial florestal e único a produzir carvão vegetal como alternativa considerada ecologicamente viável para a produção energética, observou-se produção de carvão vegetal com valores totais de 5,6 milhões de t (M t) em 2013, com valores estimados entre 8 M t e 11 M t para 2020 (Brasil, 2015). Desse modo, considera-se de extrema importância entender o processo de carbonização da madeira a fim de mapear as emissões gasosas oriundas desse processo, tendo como intuito buscar soluções para a sua redução, seja com a utilização de um queimador ou com a recuperação desses gases.

Diante de tal contexto, o presente trabalho teve por objetivo descrever as faixas de degradação térmica e a emissão de gases condensáveis e não condensáveis durante o processo de produção de carvão vegetal, além de apresentar os fenômenos termoquímicos que influenciam nesse processo, contribuindo para estudos futuros que busquem minimizar os efeitos adversos do processo de carbonização.

Material e métodos

Utilizou-se madeira de *Eucalyptus* spp., com aproximadamente 7 anos de idade, proveniente de um

teste clonal localizado na Fazenda Guaxupé, situada no município de Divinésia, MG (20,974°S e 43,088°W).

Densidade básica da madeira

Retiraram-se corpos de prova, na forma de cunhas opostas, de discos com aproximadamente 5 cm de espessura a diferentes alturas do fuste. A determinação da densidade básica da madeira foi realizada por meio da imersão em água, de acordo com a norma ABNT NBR 11941 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003).

Poder calorífico superior da madeira (PCS)

O poder calorífico superior da madeira foi determinado de acordo com a metodologia descrita pela norma ABNT NBR 8633 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984), em duplicatas, utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática IKA300.

Composição química estrutural

Os teores de extrativos da madeira foram determinados em duplicatas, de acordo com a norma TAPPI 204 OM-88 (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001), utilizando-se o método de determinação de extrativos totais, substituindo-se o etanol/benzeno por etanol/tolueno.

Os teores de lignina insolúvel foram determinados em duplicatas, pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide & Demuner (1986). O teor de lignina solúvel foi determinado por espectrometria, conforme Goldschimid (1971), a partir da diluição do filtrado proveniente do procedimento para obtenção do teor de lignina insolúvel. O teor de lignina total foi obtido por meio da soma dos teores de lignina solúvel e insolúvel. O teor de holoceluloses foi determinado por diferença, subtraindo-se de 100 os teores de lignina total e extrativos.

Composição química elementar

A determinação da composição elementar da madeira foi realizada em duplicatas, conforme metodologia descrita por Paula et al. (2011). Utilizou-se massa equivalente a 2,0 mg ($\pm 0,5$) de serragem seca à temperatura de 105 ± 2 °C, previamente selecionada em peneiras sobrepostas com malhas de 200 e 270 mesh, sendo utilizada a fração retida nessa última. Em seguida, as amostras foram depositadas no carrossel do equipamento da marca *Elementar*, modelo *Vario Micro Cube CHNS-O*, sendo realizada a análise de uma amostra por vez. Os gases necessários para a operação

foram o hélio, que é o gás de arraste, e o oxigênio, gás de ignição. A temperatura do tubo de combustão, localizado no interior do equipamento no momento da queda da amostra do carrossel, foi de 1.150 °C.

Após a combustão, os gases foram transportados por arraste para o tubo de redução e seguiram para a coluna de detecção. Os elementos químicos (carbono, nitrogênio, hidrogênio e enxofre) foram identificados por meio de um detector de termocondutividade, onde cada elemento tem interação e pico específicos. O teor de oxigênio foi determinado pelo somatório dos teores de C, N, H e S decrescido de 100.

Análises termogravimétricas da madeira

Para a análise termogravimétrica da madeira utilizou-se o aparelho *DTG-60H, Shimadzu*. As análises foram realizadas sob atmosfera de gás nitrogênio a uma vazão constante de 50 mL min⁻¹, utilizando-se aproximadamente 2 mg de serragem selecionada em peneiras sobrepostas de malha de 200 e 270 mesh, sendo a fração utilizada aquela retida nesta última. As curvas termogravimétricas foram obtidas a partir de 50 °C até a temperatura máxima de 450 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹.

A curva termogravimétrica (TG) foi obtida para avaliar a perda de massa em função da temperatura e a curva da derivada primeira (DTG), relacionando a degradação térmica em função do tempo.

A partir das curvas TG, procederam-se os cálculos de perda de massa nos seguintes intervalos de temperatura: 100-150 °C, 150-200 °C, 200-250 °C, 250-300 °C, 300-350 °C, 350-400 °C, 400-450 °C. Por fim, calculou-se a massa residual na temperatura de 450 °C.

Preparação das amostras para carbonização

A madeira foi seccionada em dimensões de 2 cm x 2 cm x 5 cm e seca em estufa de circulação de ar forçado (103 ± 2 °C), para garantir massa constante e obtê-la absolutamente seca.

Para cada carbonização utilizou-se massa de madeira média de 281 g. As carbonizações foram feitas em forno tipo mufla, sob uma taxa média de aquecimento de 1,67 °C min⁻¹, com incrementos de 50 °C a cada 30 min. A temperatura inicial foi de 100 °C e a temperatura final de 450 °C, permanecendo estabilizada nesta última por um período de 90 min, totalizando, portanto, um tempo de carbonização de 5 h.

Coleta de gases não condensáveis

Na saída da mufla foi conectado um sistema de recuperação dos gases condensáveis (GC), utilizando um condensador tubular resfriado à água acoplado a um recipiente de coleta.

Os gases não condensáveis (GNC) foram succionados por uma bomba com vazão de coleta ajustada para 1L min⁻¹, sendo conduzidos até o sistema de condicionamento de gases *Gasboard 9030 Wuhan CUBIC Optoelectronics Co. Ltda*. Antes da injeção no equipamento, os gases passaram por um processo de pré-lavagem, no qual foram encaminhados primeiramente a um kitassato para condensação do licor pirolenhoso mais denso, seguindo para posterior kitassato contendo água para resfriamento adicional dos gases e mais outros dois frascos lavadores de gás do tipo *Dreschel* contendo álcool absoluto e algodão envolvidos com gelo e armazenados em isopor. A lavagem foi necessária para evitar que possíveis gotículas de alcatrão que porventura não tivessem condensado no primeiro kitassato viessem a fazê-lo na tubulação do *Gasboard*, saturando o aparelho. Após esse caminho de pré-lavagem, os GNCs seguiram para o interior do aparelho *Gasboard 9030* e foram conduzidos para outra lavagem em água, resfriados a 4 °C em desumidificador (chiller) e, posteriormente, passados em cilindro contendo carvão ativado e algodão. Em seguida, foi realizada a última limpeza dos gases por meio de filtros de precisão, denominados FIT1 e FIT2, os quais retêm impurezas maiores que 3 µm e 1 µm, respectivamente.

Essa sucção foi realizada em intervalos de temperatura de 50 °C até a temperatura final de 450 °C, sendo feitas duas coletas para cada intervalo, onde a primeira foi entre o 12° e o 15° min e a segunda entre o 27° e o 30° min.

Concomitante a esse sistema de purificação externa e interna ao aparelho de sucção, os gases GNC seguiram até o sistema de análise de gás, denominado *Gasboard 3100 Wuhan CUBIC Optoelectronics Co. Ltda*. Este aparelho forneceu leituras da composição percentual (base volume) de CH₄, CO₂, CO e H₂, correspondendo a um total de 20 registros para cada carbonização.

A média dos dados de concentração dos principais gases de efeito estufa, como o metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), foi obtida para as três repetições até a temperatura final de carbonização. Para isso, confeccionaram-se curvas percentuais de liberação de cada componente

gasoso mediante sua evolução, caracterizando todo o processo em termos de emissão. Além disso, com os dados de concentração de cada gás e da massa dos gases

não condensáveis, foi possível mensurar a massa total (g) de cada componente do gás não condensável emitida até 450 °C, utilizando o balanço de massa descrito na Tabela 1, conforme Taccini (2010).

Tabela 1. Balanço de massa dos gases não condensáveis.

Massa específica gases não condensáveis	Equações
$(\rho_{\text{gás}}, \text{ em kg}_{\text{gás}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{gás}})$	$\rho_{\text{gás}} = [(44/0,224) \cdot X_{\text{CO}_2}] + [(28/0,224) \cdot X_{\text{CO}}] + [(2/0,224) \cdot X_{\text{H}_2}] + [(16/0,224) \cdot X_{\text{CH}_4}]$
$(M_i, \text{ em g})$	$M_{\text{CO}_2} = [(44/0,224) \cdot X_{\text{CO}_2} / \rho_{\text{gás}}] \cdot M_{\text{GNC}}$
	$M_{\text{CO}} = [(28/0,224) \cdot X_{\text{CO}} / \rho_{\text{gás}}] \cdot M_{\text{GNC}}$
	$M_{\text{H}_2} = [(2/0,224) \cdot X_{\text{H}_2} / \rho_{\text{gás}}] \cdot M_{\text{GNC}}$
	$M_{\text{CH}_4} = [(16/0,224) \cdot X_{\text{CH}_4} / \rho_{\text{gás}}] \cdot M_{\text{GNC}}$

Em que: X_{CO_2} , X_{CO} , X_{H_2} , X_{CH_4} (porcentagem mássica média de cada gás); M_{CO_2} ; M_{CO} ; M_{H_2} ; M_{CH_4} (massa de cada gás, em g); M_{GNC} (massa dos gases não condensáveis).

Os valores obtidos de M_{CO_2} , M_{CO} , M_{H_2} e M_{CH_4} foram transformados em fator de emissão ($\text{Kg}_{\text{gás}} \cdot \text{t}^{-1}_{\text{madeira}}$) com base na massa de madeira utilizada em cada carbonização, extrapolada para 1.000 kg, sendo descrito na Equação 1.

$$f = M_y \cdot \frac{1.000}{M_{\text{mads}i}} \quad (1)$$

Em que: M_y = massa de cada gás y , em g; $M_{\text{mads}i}$ = massa de madeira seca correspondente a cada carbonização i , em g.

Sistema de coleta de gases condensáveis

Para a recuperação dos gases condensáveis utilizou-se somente um condensador tubular resfriado, trocador de calor gás/água, acoplado a um recipiente de coleta (kitassato).

Nessa medição da massa de gás emitido, foram realizadas três novas carbonizações com mesma madeira, massa média e marcha de carbonização, substituindo-se o sistema de tratamento e análise dos gases não condensáveis por um sistema de sequestro de gases condensáveis. A quantificação acumulada da massa de gases condensáveis emitida foi realizada com a utilização de dois kitassatos tarados inicialmente.

Análise descritiva dos dados

Os dados da análise com um tratamento padrão (madeira totalmente seca) e três repetições (carbonizações) foram submetidos à análise descritiva, com manipulação das médias dos dados das propriedades físicas e químicas da madeira e do rendimento dos produtos da carbonização,

além de terem sido confeccionados gráficos descritivos do comportamento da carbonização. Para todas essas análises utilizou-se planilha eletrônica.

Resultados e discussão

Propriedades da madeira

A densidade básica da madeira foi igual a 0,48 g cm⁻³, valor inferior ao citado por Neves et al. (2011), que encontraram valores próximos a 0,51 g cm⁻³ para clones do mesmo gênero desenvolvidos por uma empresa florestal localizada em Minas Gerais. Encontrou-se também poder calorífico superior médio igual a 4.485 kcal kg⁻¹, compatível com os valores encontrados por Brand & Muñiz (2010) para o mesmo gênero na produção de biomassa para geração de energia. No entanto, esse valor não é considerado como potencial para a produção de carvão vegetal, uma vez que é resultado da matéria-prima que lhe deu origem e do processo de carbonização utilizado (Carneiro et al., 2013b).

A madeira continha 70,5% de holoceluloses, 26,5% de lignina e 3,1% de extrativos. Para a produção de carvão vegetal opta-se por madeiras com baixo teor de celulose e hemiceluloses, uma vez que estes componentes apresentam baixa resistência à degradação térmica e interferem significativamente na emissão de compostos gasosos (Yang et al. 2007; Shen et al., 2010). A lignina apresenta-se como principal parâmetro para escolha de clones com características satisfatórias para produção de carvão vegetal, uma vez que aumentos de seus

teores para valores próximos de 32% podem promover significativos ganhos de conversão de madeira em carvão vegetal (Brasil, 2015). Além disso, elevados teores de extrativos também não interferem no ganho em massa de carvão vegetal, uma vez que a maioria destes compostos degrada-se entre 200 °C e 500 °C, devido à sua natureza química (Grønli et al., 2002; Shebani et al., 2008).

Degradação térmica da madeira

Na Figura 1 é apresentada a curva termogravimétrica (TGA) da madeira e sua derivada (DTG).

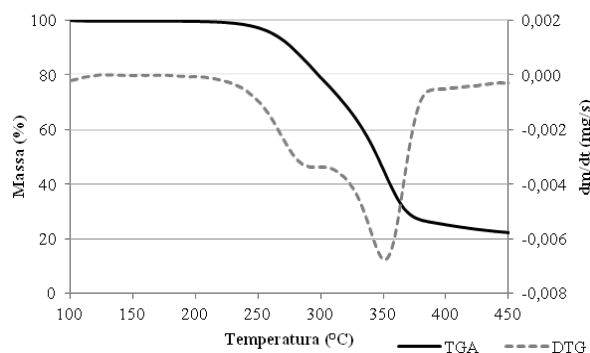


Figura 1. Curvas termogravimétrica da madeira de *Eucalyptus* spp. (TGA) e sua derivada (DTG).

Por se tratar de um material completamente seco em estufa, não se observa claramente o primeiro pico de perda de massa da madeira com relação ao incremento em temperatura (Figura 1), a qual se deve à fase de secagem da madeira, que ocorre até 200 °C (Carneiro et al., 2013b).

Após essa primeira faixa de aquecimento, observa-se um pico de perda de massa entre as temperaturas de 200 °C e 290 °C, com perda de 16,4% em massa devido à degradação das hemiceluloses (Figura 1). No intervalo entre 310 °C e 400 °C observa-se uma queda de 48,7% na curva TGA, em consequência da degradação térmica da celulose, que segue até temperaturas próximas do fim do processo (Shen et al., 2010). Entre as temperaturas de 400 °C e 450 °C observou-se uma estabilização quanto à perda de massa do material, uma vez que a resistência térmica da lignina facilita a fixação de carbono no produto formado (Yang et al., 2007).

Pode-se observar também que a degradação segue para uma pequena estabilização entre as temperaturas de 290 °C e 310 °C (Figura 1), o qual caminha para um estado de transição da degradação das hemiceluloses e celulose.

Portanto, grandes diferenças de resistência térmica podem ser observadas para os três constituintes da madeira: hemiceluloses, celulose e lignina. Cabe destacar ainda que a degradação térmica de qualquer biomassa, entre elas a madeira, pode ser considerada como a sobreposição da decomposição destes três componentes, além de sua secagem (Bianchi et al., 2010; Pereira et al., 2013).

Efeito da temperatura de carbonização nas emissões percentuais de gases não condensáveis e licor pirolenhoso

Na Figura 2 é apresentada a curva percentual de emissão de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) e licor pirolenhoso (LP) em função da temperatura de carbonização.

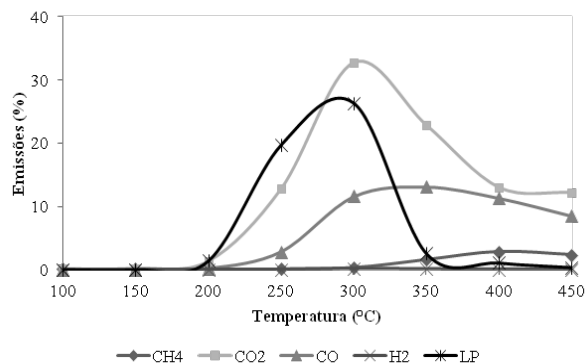


Figura 2. Percentual de emissão de gases condensáveis (LP) e não condensáveis (CH₄, CO₂, CO, e H₂) de madeira de *Eucalyptus* spp.

Nas temperaturas compreendidas entre 100 °C e 200 °C não se observou liberação significativa de gases não condensáveis ou emissão de licor pirolenhoso (LP), devido à madeira ter sido seca anteriormente à carbonização. Nessa faixa de temperatura os constituintes químicos da madeira que possuem baixa resistência térmica, como as hemiceluloses e a celulose, começaram a se degradar, percebendo-se picos emissivos muito baixos, com valores da ordem de 1,3%; 0,20%; 0,077% e 0,0% para os gases CO₂, CO, CH₄ e H₂, respectivamente. Assim, pode-se considerar que até temperaturas próximas de 200 °C ocorre secagem da madeira e nos limites dessa temperatura também se constatam perdas de massa e consequente liberação de produtos gasosos.

Elevação da temperatura a partir de 200 °C promove aumentos progressivos nas emissões de gases não condensáveis e condensáveis, tendo-se encontrado o pico máximo de emissões gasosas na faixa de temperatura que vai de 300 °C até 350 °C. Foi observada a formação de 32,69% de CO₂; 11,58% de CO; 0,14% de H₂; 26,28% do licor condensável na faixa de temperatura próxima a 300 °C, e 2,81% de CH₄ na faixa de temperatura próxima a 400 °C.

A eliminação de compostos orgânicos entre as temperaturas de 200 °C e 350 °C provavelmente se deve à quebra das ligações OH da celulose, hemiceluloses e de grupos metoxila dos anéis aromáticos que compõem a lignina (Yang et al, 2007; Shen et al. 2010). Suarez et al. (2007) afirmaram que nessa faixa de temperatura ocorre a intensificação da quebra das moléculas dos constituintes químicos da madeira, levando à formação de uma mistura de hidrocarbonetos e compostos oxigenados, lineares ou cíclicos, tais como alcanos, alquenos, cetonas, ácidos carboxílicos e aldeídos, além de monóxido e dióxido de carbono e água.

Por fim, entre as temperaturas de 350 °C e 450 °C não foi observada produção significativa de líquido condensável, porém as emissões dos gases CO₂, CO, H₂ e CH₄ seguiu em incrementos consideráveis, assim como encontrado por Yang et al. (2007) e Shen et al. (2010), observando-se sobretudo o primeiro grande pico de CH₄ (2,81% para a temperatura de 400 °C). Além disso, próximo a temperatura de 450 °C tem-se a formação de carvão, que é resultante da fixação de carbono ao material resultante, havendo pouca ou nenhuma contribuição das hemiceluloses e celulose, devendo ser encerrado visando rendimento significativo e qualidade do carvão (Oliveira et al. 2010; Pereira et al., 2013).

Cabe destacar que para a faixa de temperatura entre 300 °C e 400 °C foi observada uma fumaça de coloração amarelada, indicando a formação de novos compostos e abrindo novos caminhos de estudos para esse comportamento.

Conclusões

Picos específicos de emissão de gases condensáveis e não condensáveis podem ser observados em faixas específicas de temperatura durante o processo de carbonização, passando por um ponto de máximo entre as temperaturas de 300 °C e 350 °C, a qual se relaciona com o ponto de degradação máxima das hemiceluloses e celulose.

Durante o processo de carbonização são observadas três fases: aquecimento da madeira sem perda de massa e emissões significativas até temperaturas próximas a 200 °C; picos máximos de degradação e emissão dos gases CO₂, CO e licor pirolenhoso na faixa de temperatura que corresponde a 300 °C e 450 °C; e incrementos na produção dos gases CH₄ e H₂ de acordo com aumentos em temperatura a partir de 300 °C.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento – CNPq e à Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior – SECTES pelo apoio financeiro; à Universidade Federal de Lavras pela realização das análises térmicas da madeira; e à Embrapa Florestas pelo apoio dado para realização desse trabalho.

Referências

- Andrade, A. M. & Carvalho, L. M. Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do Estado do Rio de Janeiro. **Floresta e Ambiente**, v. 5, n.1, p. 24-42, 1998.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- Bianchi, O. et al. Avaliação da degradação não-isotérmica da madeira através de termogravimetria - TGA. **Polímeros**, v. 20, n. 5, p. 395-400, 2010. DOI: 10.1590/S0104-14282010005000060.
- Brand, M. A. & Muñiz, G. I. B. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 88, p. 619-628, 2010.
- Brasil. Ministério do Desenvolvimento da Indústria e Comércio Exterior. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Modernização da produção de carvão vegetal**: subsídios para revisão do plano siderurgia. Brasília, DF, 2015. 154 p. Disponível em: <https://cgee.org.br/documents/10182/734063/Carvao_Vegetal_WEB_02102015_10225.PDF>. Acesso em: 19 dez. 2015.
- Carneiro, A. C. O. et al. Estudo da decomposição térmica da madeira de oito espécies da Região do Seridó, Rio Grande do Norte. **Revista Árvore**, v. 37, n. 6, p. 1153-1163, 2013a. DOI: 10.1590/S0100-67622013000600017.
- Carneiro, A. C. O. et al. Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal. In: Santos, F. et al. (Org.). **Bioenergia & Biorrefinaria**: cana de açúcar & espécies florestais. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2013b. v. 1. p. 429-458.

- Goldschimid, O. Ultraviolet spectra. In: Sarkanen, K. V. & Ludwing, C. H. (Ed.). **Lignins**. New York: Wiley Interscience, 1971. p. 241-266.
- Gomide, J. L. & Demuner, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.
- Grønli, M. G. et al. Thermogravimetric analysis and devolatilization kinetics of wood. **Industry Engineering Chemistry Resources**, v. 41, n. 17, p. 4201-4208, 2002. DOI: 10.1021/ie0201157.
- Klose, W. et al. Pyrolysis and activation of different woods Thermal analysis (TG/EGA) and formal kinetics. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF CATALYTIC AND THERMOCHEMICAL CONVERSIONS OF NATURAL ORGANIC POLYMERS, 4., 2000, Krasnoyarsk. **Proceedings**. [S.l.]: Institut Chimii i Chimiceskoj Technologii, 2000.
- Neves, T. A. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011.
- Oliveira, A. C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.
- Paula, L. R. et al. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011. DOI: 10.1590/S0104-77602011000200012.
- Pereira, B. L. C. et al. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 567-576, 2013. DOI: 10.1590/S0100-67622013000300020.
- Shebani, A. N. et al. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. **Thermochim Acta**, v. 471, p. 43-50, 2008. DOI: 10.1016/j.tca.2008.02.020.
- Shen, R. et al. The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: cellulose and hemicelluloses. **Carbohydrate Polymers**, v. 82, n. 1, p. 39-45, 2010. DOI: 10.1016/j.carbpol.2010.04.018.
- Suarez, P.A. Z. 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.
- Taccini, M. M. **Estudo das metodologias da convenção-quadro das nações unidas sobre mudanças climáticas, referentes à avaliação de emissões de gases de efeito estufa na produção de carvão vegetal**. 2010. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Piracicaba.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **TAPPI test methods T 204 om-88**: solvent extractives of wood and pulp. Atlanta, 2001. Cd-Rom
- Yang, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, n. 86, p. 1781-1788, 2007. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.12.013.

