

Manuscrito avaliado e aceito pelo comitê científico do II CBCTEM

Forno macro ATG: estudo do fluxo gasoso no processo da pirólise da madeira de *Eucalyptus*

Márcia Silva de Jesus¹, Alfredo Napoli², Fernando Wallace Carvalho Andrade³, Paulo Fernando Trugilho⁴, Maria Fernanda Vieira Rocha¹, Philippe Gallet², Nabila Boutahar²

¹ Estudante da Pós-graduação, Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil.

² La Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, France.

³ Universidade Federal Rural da Amazônia, Parauapebas, Pará, Brasil.

⁴ Professor do Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil.

RESUMO No atual cenário tecnológico brasileiro, ainda é necessário o desenvolvimento de ferramentas mais eficientes que busquem explicações sobre os fenômenos que envolvem e controlam a conversão da madeira em carvão vegetal em escala próxima à industrial. Diante disso, o trabalho teve como objetivo analisar o potencial do forno piloto, Macro ATG, a partir do comportamento do fluxo gasoso durante o processo de pirólise de toretes de madeira de eucalipto. O desenvolvimento do forno foi realizado pelo laboratório BioWooEB do CIRAD-França. Foram utilizados clones de *Eucalyptus urophylla*, agrupados em duas classes de diâmetro: 8 – 10 cm e 13 – 16 cm. Foram avaliados o fluxo gasoso e gerado perfis de temperaturas dentro da madeira, afim de acompanhar a transferência de calor durante o processo. Houve aumento do fluxo gasoso entre as temperaturas de 350 a 500 °C, devido a intensificação da conversão da madeira em carvão vegetal. O volume total de gases produzidos foi da ordem de 543 cm³ e 697 cm³, respectivamente para a menor e maior classe diamétrica. As experimentações identificaram a ausência de uniformidade das temperaturas devido o processo de transferência de calor no interior do torete. A temperatura na superfície mais externa é aproximadamente 33% maior que no interior da peça de madeira. Dessa forma, o forno pode ser considerado inovação tecnológica no estudo da pirólise e da avaliação dos subprodutos gasosos e líquidos, sendo possível acompanhar, em escala macroscópica, a variação do volume gasoso e o comportamento da transferência térmica na madeira.

Palavras-chave: Tecnologia, carbonização, carvão vegetal.

Macro ATG Kiln: gaseous flow study in the pyrolysis process of *Eucalyptus*

ABSTRACT In the current Brazilian technological landscape, it is still necessary to develop more efficient tools that seek explanations of the phenomena that surround and control the conversion of wood into charcoal in close range to industrial. Thereby, the study aimed to analyze the potential of macro ATG kiln, from the gaseous flow behavior during the pyrolysis process of eucalyptus wood small logs. The manufacture of equipment was conducted by CIRAD in France and installed on Biomass Energy Laboratory – UFLA. They were used *Eucalyptus urophylla* clones diameter grouped into two classes: 8 - 10 cm and 13 - 16 cm. Temperature profiles were evaluated gaseous flow generated within the wood order to follow the heat transfer during the process. An increase of the gaseous flow between the temperatures of 350 to 500 °C due to intensification of wood decomposition. The total volume of produced gas was around 543 cm³ and 697 cm³, respectively for the smallest and largest diameter class. There is no uniformity in heat transfer within the wood, the temperature at the outer surface is approximately 33% higher than inside the piece of wood. Thus, the device can be considered technological innovation in the study of gas flow pyrolysis, and you can follow in macro scale, the change in the gas volume and the behavior of heat transfer in the wood.

Keywords: Technology, carbonization, charcoal.

Introdução

A atual demanda por recursos renováveis tem-se intensificado e uma das principais fontes que apresenta potencial para atender esse desafio de sustentabilidade é a biomassa.

Assim, a otimização do uso da biomassa busca a utilização de sistemas integrados como matérias-primas, processos, tecnologias e produtos, de acordo com parâmetros técnicos que consideram o balanço de massa e energia, o ciclo de vida, a geração e o consumo dos produtos e serviços de forma distribuída, além da mitigação da emissão de gases de efeito estufa.

Nesse sentido, as plantações florestais energéticas de eucalipto, implantada principalmente no Brasil, torna-se uma importante fonte sustentável de carvão vegetal, com produção de carbono neutro.

O Brasil é líder mundial na utilização de carvão vegetal como biorredutor na indústria siderúrgica e se destaca como modelo na produção de carvão para este setor. Em 2013, o Brasil registrou área plantada de 7,6 milhões de hectares de florestas, sendo que 72% são árvores de eucalipto, com aumentos significativos nos estados situados em novas fronteiras como Maranhão, Tocantins, Piauí, Pará e Mato Grosso do Sul. Desse total, cerca de 15% são destinados à produção de carvão vegetal para siderurgia, onde é utilizado como termorredutor para o minério de ferro (IBÁ, 2014).

Por outro lado, ressalta-se que as tecnologias atualmente empregadas para pirólise e/ou carbonização da madeira são ineficientes, tendo em vista que são gerados durante o processo, além do carvão vegetal, mais de 70% de massa sob forma de co-produtos como gases e alcatrão com alto potencial energético, mas sem utilização adequada.

Também é importante ressaltar, que a temperatura não age de forma isolada nas reações de pirólise, existindo fatores adicionais como propriedades físicas e químicas da matéria-prima e do carvão vegetal (umidade do material, densidade,

composição química, condutividade, etc) e parâmetros do processo (taxa de aquecimento, pressão e atmosfera).

Desta forma, faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas mais eficientes que busquem melhor entender e explicar os fenômenos térmicos e químicos que envolvem e controlam a conversão da madeira em carvão vegetal, em escala próxima à industrial. Além de entender os mecanismos e a cinética das reações, e sua relação com o rendimento e eficiência energética do processo (PENEDO, 1982).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento do fluxo gasoso e destacar o potencial do forno piloto, Macro ATG, para o estudo da pirólise de toretes de madeira de eucalipto.

Material e Métodos

O desenvolvimento do equipamento piloto no processo de pirólise da madeira foi realizado pelo Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agronômica para o Desenvolvimento – CIRAD, França.

O protótipo chamado Macro ATG, é composto por um forno elétrico, cuja temperatura pode atingir até 1.000°C, apresenta também um reator de pirólise, uma célula de carga, um controlador de pressão, um condensador do líquido pirolenhoso, um fluxômetro e um cromatógrafo gasoso. As experimentações são controladas por um painel de controle e um software desenvolvido especificamente pelo Cirad (Figura 1). Os testes podem ser realizados a partir da introdução de vários gases (N₂, O₂, CO₂, CO e H₂.) simulando condições tanto para a combustão parcial ou pirólise total, na presença de atmosfera inerte.

Nesse trabalho foram utilizados toretes de clones de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, 6 anos de idade e 30 cm de comprimento, agrupados em duas classes de diâmetro: 8 – 10 cm e 13 – 16 cm e umidade média de 16%.

As condições para a pirólise da madeira foram:

- Temperatura inicial: 40 °C;
- Temperatura final: 500 °C;
- Taxa de aquecimento: 5 °C.min-1;
- Patamar de residência na temperatura final: 1 e 2 horas

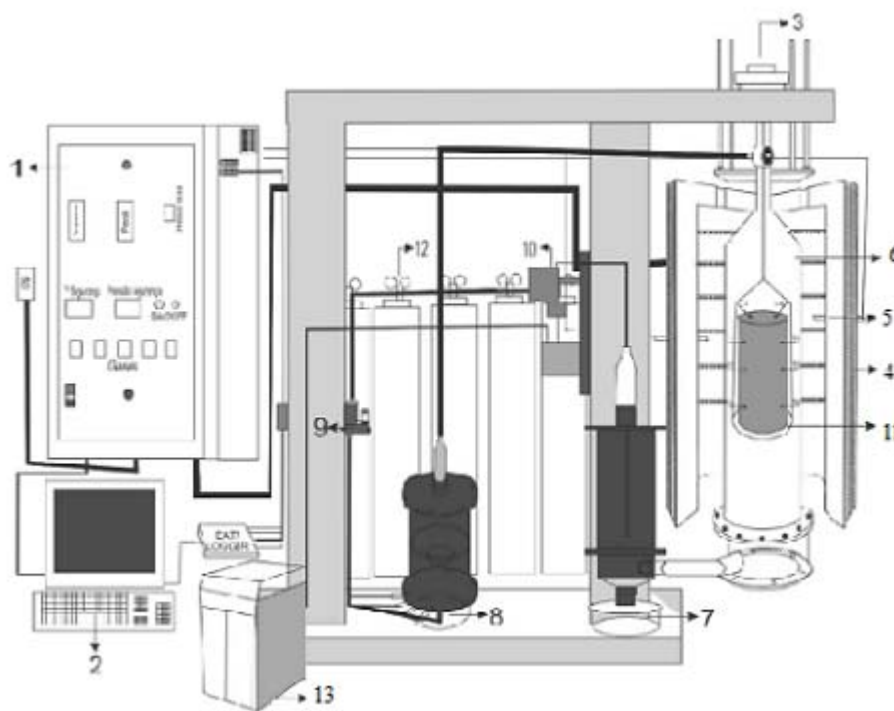
para as classes de diâmetro de 8 – 10 cm e 13 – 16 cm, respectivamente;

- Atmosfera: gás nitrogênio – N₂;
- Fluxo do gás (N₂): 10 NL.min-1;
- Período de resfriamento: 15 horas.

Nos toretes foram conectados 4 termopares, cuja disposição na madeira foi no sentido casca para medula, sendo um localizado na superfície mais externa, próxima à casca, outros

2 mais internos, e um último próximo ao centro, na medula. Sua função é captar a variação da transferência de calor dentro do torete e traçar seu perfil térmico durante o processo da pirólise.

Durante o processo de decomposição térmica da madeira, os voláteis produzidos são coletados em um condensador de líquido pirolenhoso, equipado com um filtro eletrostático que permite a recuperação eficiente dos compostos condensáveis. Assim, a produção de gases gerados é quantificada por meio de um medidor de fluxo.



Legenda:

- | | |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1- Painel de controle | 8- Misturador de gases |
| 2- Aquisição de dados | 9- Fluxômetros |
| 3- Célula de carga – balança | 10- Regulador de pressão e vazão |
| 4- Forno | 11- Cadinho |
| 5- Regulação e segurança | 12- Cilindro de gases |
| 6- Reator de pirólise | 13- Cromatógrafo |
| 7- Condensador | |

Figura 1. Layout do equipamento piloto de pirólise – forno Macro ATG.

Figure 1. Layout of pyrolysis pilot-plant – Macro ATG kiln.

Resultados e Discussão

O gráfico 1 apresenta a temperatura do reator e fluxo de gases da pirólise em função do tempo para a classe de menor diâmetro.

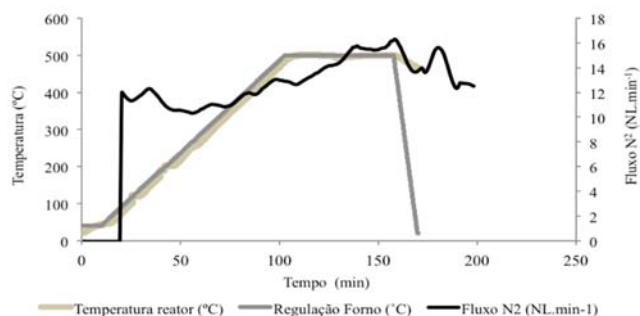


Gráfico 1. Fluxo de gás nitrogênio - N_2 e parâmetros do forno durante a pirólise do torete de *Eucalyptus urophylla*, da classe 8 – 10 cm, em função da temperatura e tempo.

Graphic 1. Nitrogen gas flow - N_2 and kiln parameters during the pyrolysis of *Eucalyptus urophylla* logs from 8-10 cm class as a function of temperature and time.

O Gráfico 2 apresenta a temperatura do reator, temperatura interna do torete e fluxo de gases da pirólise em função do tempo para a classe de maior diâmetro.

Foi observado que o forno atendeu corretamente todos os comandos do software controlador do processo (Gráficos 1 e

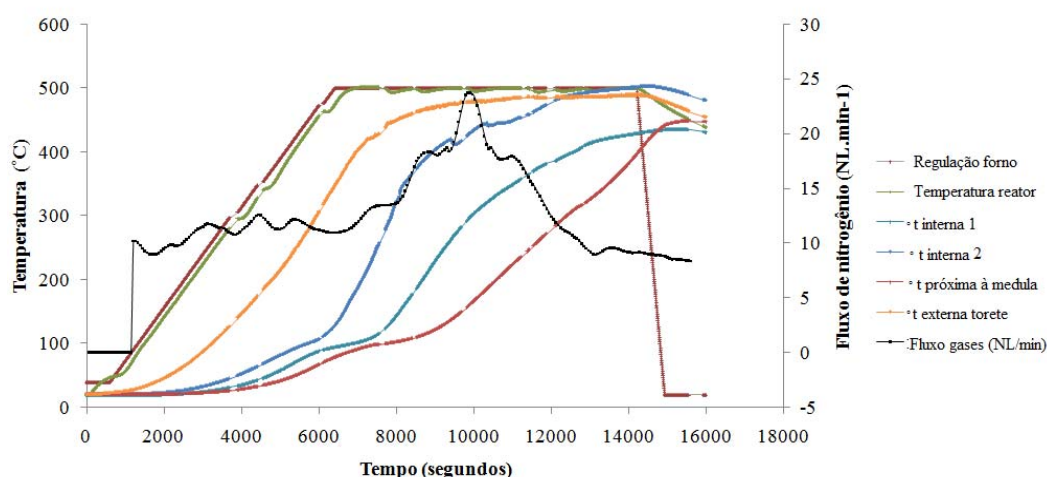


Gráfico 2. Comportamento do fluxo de gás nitrogênio, parâmetros do forno e transferência térmica da superfície externa e interna do torete *Eucalyptus urophylla*, da classe 13 – 16 cm durante a pirólise, em função da temperatura e tempo.

Graphic 2. Nitrogen gas flow behavior, kiln parameters and thermal transference of external and internal surface of *Eucalyptus urophylla* logs from class 13-16 cm during the pyrolysis as a function of temperature and time.

2). No parâmetro temperatura, que é medido a partir da resistência elétrica – atuador –, o patamar de aquecimento na temperatura final de 500 °C manteve residência de 1 e 2 h, respectivamente, para as classes de diâmetros 8 – 10 cm e 13 – 16 cm, respondendo positivamente aos comandos, assim como o processo de resfriamento após a pirólise, cuja taxa, até atingir temperatura ambiente, foi de 0,49 °C.min⁻¹ e 0,47 °C.min⁻¹, respectivamente para menor e maior classe diamétrica.

No Gráfico 2 foi observado perfis de temperaturas dentro da madeira durante a pirólise, sendo que apenas a superfície externa segue o padrão de temperatura do forno. Esses diferentes perfis ocorrem devido a transferência térmica ser um processo lento.

Observa-se ainda no Gráfico 2, que o fluxo de gases atinge o maior pico entre os 900 e 1000 segundos, aproximadamente 2 horas e 35 minutos após o início da pirólise, nesse intervalo o perfil térmico interno no torete varia. Sendo que, a temperatura na superfície externa está a 480 °C, interna (1) a 420 °C,

interna (2) a 310 e próximo a medula 160 °C, que em média corresponde a 340 °C. De acordo com Rezende (2006), Elyounssi et al. (2010) e Trugilho et al. (2001) nessa faixa de temperatura há expressiva perda de massa, devido a intensificação da decomposição dos componentes químicos da madeira, principalmente celulose e as hemiceluloses.

Devido à transferência térmica ser um processo lento na madeira, não há uniformidade na sua degradação, dessa forma, próximo à medula, a temperatura é aproximadamente 33% menor que a temperatura na superfície mais externa do torete, o que geralmente são os responsáveis pela geração de atijos nas empresas de produção de carvão vegetal.

Já os Gráficos 3 e 4 representam o fluxo gasoso acumulado e sua variação em função do tempo durante o processo de pirólise dos toretes de madeira, em função da temperatura e do tempo, para ambas as classes diamétricas.

No experimento cujo diâmetro foi da classe 8 – 10 cm (Gráfico 3), o fluxo gasoso contínuo de 10 NL.min⁻¹ obteve incrementos significativos a partir de 370 °C, em 80 minutos de pirólise, atingindo seu pico de 18 NL.min⁻¹ aos 155 minutos, que corresponde a 55 minutos de residência na temperatura de 500 °C. Sendo que não foram descontados os valores do fluxo de nitrogênio.

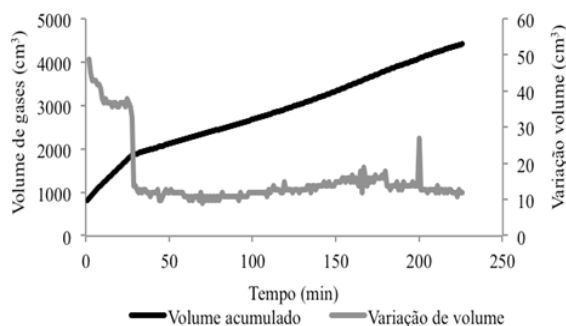


Gráfico 3. Evolução do volume de gás acumulado e fluxo de gases produzidos durante a pirólise do torete de *Eucalyptus urophylla*, da classe 8 – 10 cm.

Graphic 3. Evolution of accumulated gas volume and gas flow produced during the pyrolysis of *Eucalyptus urophylla* logs from class 8-10 cm.

Na classe diamétrica 13 – 16 cm (Gráfico 4) o maior incremento do fluxo gasoso foi observado acima de 300 °C, atingindo seu pico máximo de 24 NL.min⁻¹ aos 166 minutos, que corresponde a 66 minutos de residência na temperatura de 500 °C.

Os picos observados na variação de volume até 200 °C possivelmente estão relacionados à eliminação de vapores d'água. Segundo Martins (1980) e Brito et al. (2006) as reações endotérmicas que ocorrem abaixo dessa temperatura estão relacionadas a perda de energia do sistema para realizar a secagem, ocorre também reações de desidratação dos grupos OH –hidroxilas – presentes nos polissacarídeos.

Já os picos observados nas temperaturas superiores a 250 °C, estão relacionados à degradação da fração mais reativa da composição química da madeira, as hemiceluloses, seguida da celulose, o que provavelmente ocasionou o aumento do fluxo gasoso e, conseqüentemente, o maior pico, liberando gases como monóxido de carbono, ácido metanóico, ácido acético entre outros, que também são potencialmente combustíveis (JANKOWSKY, 1986; ROWELL, 1991; BRANCA; DI BLASI, 2003).

O volume total de gases produzidos foi da ordem de 543 cm³, na pirólise da classe 8 – 10 cm, e 697 cm³, na pirólise da classe 13 – 16 cm. Esses resultados estão de acordo com os

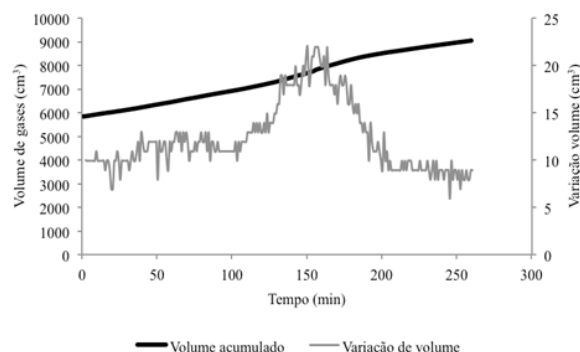


Gráfico 4. Fluxo gasoso acumulado e variação do fluxo em função do tempo durante a pirólise do torete de *Eucalyptus urophylla*, da classe 13 – 16 cm.

Graphic 4. Accumulated gas flow and flow variation as a function of time during the pyrolysis of *Eucalyptus urophylla* logs from class 13-16 cm.

trabalhos de Pereira et al. (2013), Santos et al. (2012), Brito (1992) e Cordero (1990) que verificaram que a maior perda de massa (até 50%) e, conseqüentemente, maior volume de gases, ocorre na faixa de degradação da celulose. Nessa etapa do processo a uma intensificação da conversão da madeira em carvão vegetal. Segundo GAO et al. (2004) a celulose é o componente químico com maior contribuição sobre a degradação térmica da madeira, por apresentar também alta taxa de pirólise.

Conclusões

- O forno Macro ATG apresentou resultados satisfatórios durante o processo de pirólise de toretes de madeira.
- O forno pode ser considerado inovação tecnológica no estudo de fluxo gasoso da pirólise.
- A partir do forno Macro ATG é possível acompanhar, em escala macro, a variação do volume gasoso e o comportamento da transferência térmica no interior do torete de madeira.

Referências

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Associação que representa os segmentos de painéis e pisos de madeira, celulose, papel e florestas energéticas. 2014. 100 p.

BRANCA, C.; DI BLASI, C. D. Kinetics of the isothermal degradation of wood in the temperature range 528-708 K. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 67, n. 1, p. 207-219, 2003.

BRITO, J.O. Estudo das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus citriodora* sobre os resíduos sólidos da pirólise. 1992. 88 p. Tese - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

BRITO, J.O.; LACLAU, J.P. ; RIOM, M.; QUIRINO, W. F. Le charbon de bois au Brésil. *Bois et Forêts des Tropiques*, v. 2, n. 288, p. 58-59, 2006.

CORDERO, T.; RODRÍGUEZ-MAROTO, J; RODRÍGUEZ-MIRASOL; RODRÍGUEZ, J.J. On the kinetics of thermal decomposition of wood and wood components. *Thermochemical Acta*, v. 164, n. 15, p. 135-144, 1990.

ELYOUNSSI, K.; BLIN, J. L.; HALIM, M. High-yield charcoal production by two-step pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2010. s. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 87, n. 1, p. 138-143, 2010.

GAO, M.; SUN, C.; ZHU, K. Thermal degradation of wood treated with guanidine compounds in air. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 75, n. 1, p. 221-232, 2004.

JANKOWSKY, I. P. Potencialidade de creosoto de *Eucalyptus* spp. como preservativo para madeiras. 1986. 159 p. Tese – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

ROWELL, R. M. Chemical Modification of Wood. In: *Wood and cellulosic chemistry*. New York, 1991, p. 703-756.

MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: PENEDO, W.R. *Uso da Madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte: CETEC, 1980, p. 9-26.

PENEDO, W.R. Manual de construção e operação de fornos de carbonização. Belo Horizonte: CETEC, 1982, 158 p.

PEREIRA, B.L.C. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. *Revista Árvore*, v. 37, n. 3, p. 567-576, 2013.

REZENDE, M. E. Produção de carvão vegetal - importância do conhecimento fundamental. Belo Horizonte, 2006. Curso: Fundamentos e práticas da carbonização da biomassa, ministrado durante o Seminário: Prática, logística, gerenciamento e estratégias para o sucesso da conversão da matéria lenhosa em carvão vegetal para uso na metalurgia e indústria.

SANTOS, R.C. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. *Revista Cerne*, v. 18, n.1, p. 143-151, 2012.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. *Revista Cerne*, v. 7, n. 2, p. 114- 201, 2001.