

Construção de reator metálico para a carbonização de madeira com aproveitamento da fumaça condensada

*Washington Luiz Esteves Magalhães¹
Edson Alves de Lima²
Joubert Alexandro Machado³
Estefano Paludzyszyn Filho⁴*

O Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do mundo. Em 2005, o consumo de carvão atingiu seu ponto máximo, quando foram produzidos e consumidos mais de 38 milhões de metros cúbicos de carvão (mdc) (CALAIS, 2009). A siderurgia é responsável pelo consumo de 85% deste carvão, enquanto que os 15% restantes referem-se ao consumo residencial (CARNEIRO, 2010).

Do ponto de vista ambiental, o carvão vegetal leva grande vantagem em relação ao carvão mineral devido a sua origem ser de fonte renovável. No entanto, os atuais processos de carbonização são de baixo rendimento e eficiência energética, além de não serem isentos de poluição. Durante a carbonização, são liberados gases de efeito estufa (GEE) como CO, CO₂ e CH₄, dentre outros hidrocarbonetos de cadeia curta (FERREIRA, 2000).

Em torno de 80% da produção de carvão brasileiro são oriundos de fornos ineficientes energeticamente, onde os gases gerados são eliminados para a atmosfera sem o aproveitamento energético ou de

produtos condensados. O rendimento médio gira em torno de 20% a 25%, ou seja, de 100 kg de madeira carbonizada, 75 kg a 80 kg são perdidos para a atmosfera na forma de gases condensáveis e não condensáveis (LIMA et al., 2007). Neste sentido, torna-se necessário o desenvolvimento de sistemas de carbonização buscando maior rendimento em carvão, melhor aproveitamento de energia e menor emissão de poluentes.

Este comunicado apresenta um protótipo de reator cilíndrico metálico encamisado para a carbonização de madeira, visando maior aproveitamento da energia e de produtos do processo de pirólise. Os gases emitidos durante a carbonização são condensados parcialmente e guardados para uso futuro e a parte não condensada é queimada em fornalha, para maior eficiência energética. O reator opera dentro de uma fornalha construída com material refratário, para minorar as perdas de energia ao ambiente externo, durante o aquecimento do reator. A madeira a ser transformada em carvão não entra em combustão, sofrendo a pirólise apenas

¹Engenheiro Químico, Doutor, Pesquisador da Embrapa Florestas, wmagalha@cnpf.embrapa.br

²Licenciado em Ciências Agrícolas, Doutor, Pesquisador da Embrapa Florestas, edson@cnpf.embrapa.br

³Engenheiro Químico, Mestrando de Eng. Materiais da UEPG, joubert_alex@yahoo.com.br

⁴Engenheiro-agrônomo, Doutor, Pesquisador da Embrapa Florestas, estefano@cnpf.embrapa.br

por aquecimento do reator. Foram avaliados o rendimento e a qualidade do carvão, assim como a composição do licor pirolenhoso condensado para duas condições de operação do reator.

Para a avaliação do equipamento desenvolvido, foi usada madeira de eucalipto (*Eucalyptus benthamii*), com 7 anos de idade, como matéria-prima para a carbonização.

Como fontes de energia para o aquecimento do reator, foram usadas madeiras de pínus (*Pinus taeda*) e também de eucalipto (*E. dunnii*). A cinética de carbonização foi dependente do gênero de

madeira usada, visto que as cinéticas de combustão das madeiras usadas são distintas.

O reator foi construído em aço carbono, com volume interno de 6 dm³.

A fornalha usada para a combustão de lenha, visando ao aquecimento do reator, foi construída com tijolos e argamassa refratários.

Dados construtivos do reator

O desenho esquemático do reator de carbonização é mostrado na Figura 1.

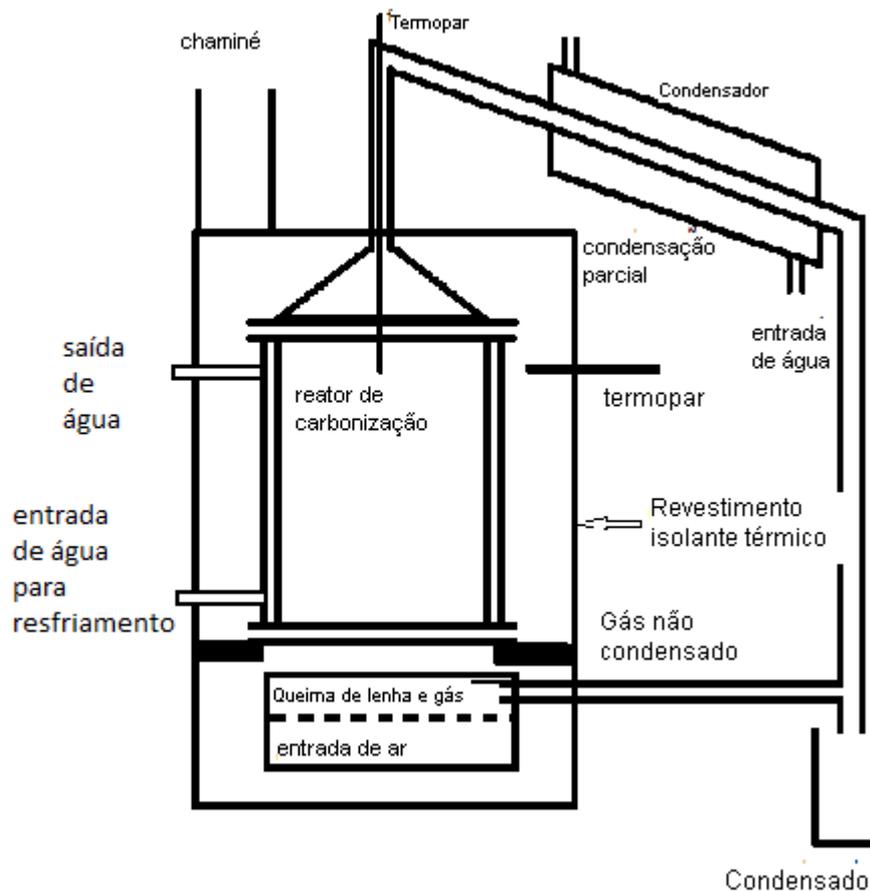


Figura 1. Desenho esquemático do reator de carbonização dentro de uma fornalha com revestimento refratário e a coleta de gases da pirólise com condensação parcial da fumaça. Parte da fumaça não condensada é queimada para fornecer energia ao processo e o restante é coletado para outros usos.

O reator foi construído em aço carbono, com formato cilíndrico e encamisado. O reator possui dois flanges, um superior e outro inferior, para permitir a alimentação interna com a madeira a ser carbonizada. O flange inferior é cego e vedado com um anel de fibrocimento, para impedir a entrada de ar.

O flange superior é conectado a um chapéu coletor, também em aço carbono, a fim de canalizar os gases provenientes da pirólise para um tubo metálico. Este último atravessa um trocador de calor simples do tipo casco e tubo, com apenas um passe. O líquido refrigerante é a água. O trocador de calor é projetado para que não ocorra a condensação total dos condensáveis presentes nos gases da pirólise.

O processo de pirólise ocorre no interior do reator, com energia oriunda da fornalha, ou seja, não se promove a queima de madeira no interior do reator.

Os gases não condensados são conduzidos até a fornalha para a sua combustão completa, visando fornecer energia ao processo de pirólise.

Construiu-se uma fornalha para a queima de lenha e também dos gases não totalmente condensados no trocador de calor. Feita com tijolos e argamassa refratários, o volume paralelepípedo é suficiente para conter o reator de carbonização. Dessa forma, a fornalha serve tanto para a combustão dos combustíveis (madeira e gases) que fornecerão energia ao reator, como para o isolamento externo, otimizando o uso da energia durante o processo de pirólise.

Dentro da fornalha, o reator é apoiado sobre suportes que separam a câmara de combustão em duas partes. Na parte inferior, existe uma abertura frontal para a alimentação de lenha e entrada de ar. A chama fica em contato com o fundo do reator e os gases da combustão passam para a parte superior da fornalha onde ajudam a aquecer a parede lateral do reator cilíndrico. Depois de circular no reator, os gases quentes da combustão são direcionados para uma chaminé.

O procedimento de operação do reator de carbonização é simples. Alimenta-se o reator com madeira seca a ser carbonizada e fecham-se os flanges vedados com anéis de fibrocimento, conectando-se as tubulações, na sequência.

A fornalha é alimentada com madeira e, a seguir, faz-se a sua ignição para dar início ao processo de aquecimento do reator.

A fase inicial da carbonização é endotérmica e necessita-se de uma grande quantidade de calor para o início do processo de pirólise. Quando esta começa, o material lignocelulósico é termicamente degradado, gerando gases que são parcialmente condensados no trocador de calor. Os gases não condensados no trocador são conduzidos de volta à fornalha, para a sua combustão e geração de mais energia ao processo.

Apenas para dar a partida do reator, faz-se necessária a queima de lenha na fornalha. Um

subproduto do processo é o chamado licor pirolenhoso, que é coletado no frasco condensador. A parte oleosa em separado do licor pode ser usada para a queima na fornalha, como fonte de energia à pirólise.

Exemplos de operação do reator e caracterização dos produtos obtidos

Para o monitoramento da temperatura, são colocados termopares na fornalha e também no interior do reator de carbonização. As temperaturas são coletadas e registradas no interior do reator e também em dois pontos da fornalha, um em cada parte (superior e inferior) da fornalha.

A Figura 2 A mostra os perfis de temperatura dentro da fornalha e também no interior do reator metálico, quando foi usada como fonte de energia a madeira de *E. dunnii*, sendo carbonizada dentro do reator a própria madeira dessa espécie.

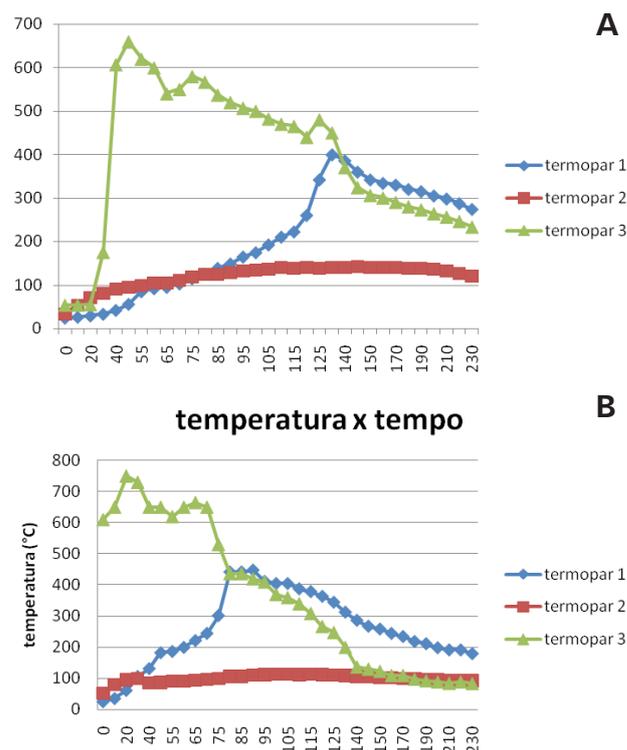


Figura 2. Perfil 1 de temperaturas (°C). Termopar 1 : interior do reator; Termopar 2: parte superior do forno; Termopar 3: parte inferior do forno; (A) Madeira queimada de *E. dunnii*; (B) Madeira queimada de *P. taeda*.

Quando a madeira de eucalipto é queimada, a temperatura na parte inferior da fornalha atinge valores acima de 650 °C em cerca de 45 minutos, depois oscila entre 600 °C e 530 °C, decrescendo para 220 °C, aos 230 minutos. A temperatura no

interior do reator apresenta um pico aos 130 min devido às reações exotérmicas em uma das fases de pirólise. Nesta fase é que ocorrem as maiores liberações de gases combustíveis provenientes da pirólise. Parte destes gases é queimada, causando um pico da temperatura na fornalha.

A Figura 2B mostra os perfis de temperatura dentro da fornalha e do reator de carbonização quando a fonte de energia é a madeira de *P. taeda*.

Para o caso de se usar a madeira de pínus como fonte de energia, os perfis de temperatura na fornalha e no reator são diferentes do caso anterior, com madeira de eucalipto. Aqui, a temperatura ultrapassa 750 °C em apenas 20 minutos e se mantém acima dos 600 °C até cerca de 70 minutos. Todavia, a temperatura decresce mais rapidamente que no caso anterior, atingindo e mantendo-se nos 100 °C, aos 140 minutos.

As diferentes taxas de aquecimento são devidas à porosidade e à composição química das lenhas usadas. A madeira de pínus apresenta um poder calorífico ligeiramente superior à madeira de eucalipto (QUIRINO et al., 2005), mas não é suficiente para explicar a distinção entre as cinéticas de combustão. A maior porosidade do

pínus acarreta que a sua lenha tenha mais espaços internos preenchidos com ar e, portanto, com maior concentração de oxigênio em íntimo contato com a parede celular, quando comparado à lenha de eucalipto (SARDINHA et al., 2002). Isso causa uma maior taxa de combustão inicial da madeira de pínus, quando comparada à de eucalipto. Outro fator é a maior concentração de extrativos nessa madeira. Estes extrativos são mais voláteis que os principais componentes da parede celular. Assim, os vapores dos extrativos entram em combustão mais rapidamente que as demais macromoléculas. Todavia, a combustão acelerada inicial causa um consumo de madeira de pínus muito mais rapidamente que a de eucalipto. Dessa forma, após um curto período de tempo, sobra pouca madeira de pínus para entrar em combustão e manter a temperatura interna da fornalha, e a temperatura cai mais abruptamente que no caso da madeira de eucalipto.

Diferentes perfis de temperatura devem originar não apenas rendimentos de carvões (Tabela 1), mas, também, produtos distintos da pirólise (Tabelas 2 e 3).

A Tabela 2 mostra a análise imediata dos carvões obtidos no reator com os dois perfis de temperatura usados.

Tabela 1. Rendimentos de carvão e licor pirolenhoso para os dois perfis de temperatura usados.

| | Massa de lenha queimada (g) | Massa inicial de madeira de <i>E. dunnii</i> no reator (g) | Rendimento em carvão (%) | Rendimento em licor pirolenhoso (%) |
|----------|-----------------------------|--|--------------------------|-------------------------------------|
| Perfil 1 | 3.100 (eucalipto) | 1.410 | 33 | 45 |
| Perfil 2 | 3.080 (pinus) | 1.410 | 40 | 42 |

Tabela 2. Análise imediata dos carvões gerados no reator de carbonização, usando-se os dois perfis de temperatura mostrados nas Figuras 2A e 2B.

| Amostra | Cinzas (%) | Voláteis (%) | Carbono fixo (%) | Poder calorífico (MJ/kg) |
|----------------------------|-------------|--------------|------------------|--------------------------|
| Perfil 1- <i>E. dunnii</i> | 3,40 ± 0,10 | 31,17 ± 0,15 | 65,43 ± 0,46 | 29,30 ± 0,15 |
| Perfil 2- <i>E. dunnii</i> | 1,18 ± 0,17 | 27,50 ± 0,11 | 71,32 ± 0,06 | 30,04 ± 0,27 |

A Tabela 3 mostra as composições dos licores pirolenhoso obtidos com diferentes perfis de temperatura no reator de pirólise. Os compostos avaliados são os mesmos, nos diferentes perfis

de temperatura, todavia, a concentração deles na mistura varia significativamente. Os perfis de temperatura (Perfil 1 e Perfil 2) no reator e fornalha podem ser vistos nas Figuras 2 e 3.

Tabela 3. Composição do licor pirolenhoso da pirólise de madeira de *E. dunnii* usando como fonte de energia a combustão de madeira de *E. dunnii* e de *P. taeda*.

| Composto | TR | Madeira usada como fonte de energia | | | |
|--------------------------|-------|-------------------------------------|------|----------|------|
| | | Perfil 1 | | Perfil 2 | |
| | | % | µg/g | % | µg/g |
| 4 Etil guaiacol | 10.66 | 5,9 | 165 | 0,2 | 2 |
| Siringol | 10.75 | 5,9 | 165 | 0,4 | 4 |
| Metil 4 etil guaiacol | 11.60 | 3,7 | 104 | 0,1 | 1 |
| Eugenol | 11.64 | 3,7 | 104 | 0,1 | 1 |
| 4 propil guaiacol | 11.70 | 3,7 | 104 | 0,3 | 3 |
| 4 metil siringol | 11.81 | 10,2 | 283 | 7,0 | 70 |
| 4 etil siringol | 12.64 | 30,2 | 842 | 14,2 | 141 |
| Metil 4 etil siringol | 13.01 | 1,4 | 40 | 8,1 | 80 |
| acetovanilone | 13.18 | 1,3 | 37 | 0,7 | 7 |
| 4-(2 propenyl-) siringol | 13.50 | 27,1 | 754 | 19,5 | 193 |
| 4 propil siringol | 13.54 | 27,1 | 754 | 19,5 | 193 |
| Siringaldeido | 14.39 | 2,0 | 55 | 1,5 | 15 |
| Total | | 100 | | 100 | |

Considerações finais

O reator obteve bom desempenho no rendimento e qualidade do carvão. Entretanto, novas pesquisas deverão ser realizadas visando ao aproveitamento dos produtos condensados e dos gases não condensáveis.

Referências

CALAIS, D. **Florestas energéticas no Brasil: demanda e disponibilidade.** Belo Horizonte: Associação Mineira de Silvicultura, 2009. 23 p. Disponível em: <http://www.silviminas.com.br/Publicacao/Arquivos/publicacao_585.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2011.

CARNEIRO, A. C. O. **Qualidade da madeira para produção de carvão vegetal.** Slides apresentados no II Fórum Nacional de Carvão Vegetal, 2010, Sete Lagoas. Disponível em: <http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/doc_qualidade_vegetal_23002.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2011.

LIMA, E. A. de; SILVA, H. D. da; MAGALHÃES, W. L. E.; LAVORANTI, O. J. **Caracterização individual de árvores de *Eucalyptus benthamii* para uso energético.** Colombo: Embrapa Florestas, 2007. (Embrapa Florestas. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 35). 1 CD-ROM. Disponível em: <http://www.cnpf.embrapa.br/publica/bolpesdes/edicoes/BPD35_CD.pdf> Acesso em: 05 mar. 2011.

FERREIRA, O. C. Emissões de gases de efeito estufa na produção e no uso do carvão vegetal. **Revista Economia & Energia**, n. 20, maio 2000. Disponível em: <<http://ecen.com/eee20/emiscarv.htm>>. Acesso em: 10 ago. 2011.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. do; ANDRADE, A. P. A. de; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. dos S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 89, p. 100-106, 2005. Disponível em: <<http://www.funtec.org.br/arquivos/podercalorifico.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2010.

SARDINHA, A. M.; MACEDO, F. W.; MACEDO, F. V. Combustão lenhosa directa e indirecta sua relevância para a temática dos fogos florestais. Lisboa – Portugal. **Revista Silva Lusitana**, Oeiras, v. 10, n. 1, p. 91-100, 2002.

Comunicado Técnico, 282

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na: **Embrapa Florestas**
Endereço: Estrada da Ribeira Km 111, CP 319
Fone / Fax: (0**) 41 3675-5600
E-mail: sac@cnpf.embrapa.br



1ª edição
Versão eletrônica (2011)

Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento



Comitê de Publicações

Presidente: *Patrícia Póvoa de Mattos*
Secretária-Executiva: *Elisabete Marques Oaida*
Membros: *Álvaro Figueredo dos Santos, Antonio Aparecido Carpanezi, Claudia Maria Branco de Freitas Maia, Dalva Luiz de Queiroz, Guilherme Schnell e Schuhli, Luís Cláudio Maranhão Froufe, Marilice Cordeiro Garrastazu, Sérgio Gaiad*

Expediente

Supervisão editorial: *Patrícia Póvoa de Mattos*
Revisão de texto: *Mauro Marcelo Berté*
Normalização bibliográfica: *Francisca Rasche*
Editoração eletrônica: *Mauro Marcelo Berté*