

# A FORNALHA CELULAR COMO FONTE DE CONTROLE DA POLUIÇÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA NO PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO UTILIZANDO FORNO CONTAINER<sup>1</sup>

*Cellular Furnace as a Pollution and Energy Generation Control Source in Carbonization Using Container Oven*

Daniel Camara Barcellos<sup>2</sup>, Benedito Rocha Vital<sup>3</sup>, Juarez de Souza e Silva<sup>4</sup>, Alexandre Santos Pimenta<sup>3</sup> e Luiz Carlos Couto<sup>5</sup>

**Resumo:** O presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da fornalha celular no controle da fumaça da carbonização, utilizando forno *container*. A fornalha foi construída com tijolos comuns, tijolos refratários, argamassa, vergalhões e chapas metálicas. Usou-se um forno de carbonização semicontínuo tipo *container*, com capacidade para 1,5 st de lenha, para produção de carvão vegetal, sendo a fumaça do processo conduzida até a célula de queima da fornalha, onde era queimada. A temperatura média de entrada dos gases foi de 185 °C e a de saída de 630 °C, resultado superior a queimadores encontrados em literatura, o que indica grande eficiência da fornalha no controle da poluição. A temperatura média do gás de saída foi de 143 °C, num volume de aproximadamente 50 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>, calor que pode ser aproveitado para um outro uso, como a secagem de lenha.

**Palavras-chave:** Forno *container*, fornalha celular, controle de poluição queimadores e balanço de massa e energia.

**Abstract:** This work aimed to evaluate the efficiency of a cellular furnace in controlling carbonization gas emissions using a container oven. The furnace was made of common bricks, firebricks, cement, square iron bars and metallic plates. A container - type, semi continuous carbonization oven for vegetal carbon production with 1.5 st firewood capacity was used, with the gas being conducted up to the furnace burning cell where it was burnt. Average temperature of gas inflow and outflow was 185 °C and 630 °C, respectively, higher than that of burners cited in the literature, indicating the great efficiency of furnaces in controlling pollution. Average temperature of outflow gas was 143 °C at a value of around 50 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>, being useful for other purposes, such as firewood drying.

**Key words:** Container oven, cellular furnace, pollution control, burners, mass and energy balance.

---

<sup>1</sup> Recebido para publicação em 23.7.2004 e aceito em 16.12.2004.

<sup>2</sup> Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal do Dep. de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa – DEF/UFV, <camara@uai.com.br>; <sup>3</sup> Prof. do Dep. de Engenharia Florestal – DEF/UFV; <sup>4</sup> Prof. do Departamento de Engenharia Agrícola – DEA/UFV; <sup>5</sup> Prof. da Universidade Estadual do Centro Oeste – UNICENTRO.

## 1 INTRODUÇÃO

As perspectivas de diminuição de oferta de combustíveis fósseis, as novas restrições ecológicas e o consumo crescente de energia têm propiciado a retomada de interesse do uso da biomassa para produção de energia. Este fato é compreensível, visto que a biomassa é uma matéria-prima energética importante, renovável e pouco poluente, comparada aos outros tipos de combustíveis (Seye & Pinheiro, 2001).

Atualmente, como a maioria da madeira utilizada na produção de carvão é originada de florestas plantadas e manejadas para esta finalidade, teoricamente o  $\text{CO}_2$  proveniente da carbonização não é considerado um causador de problemas ambientais, visto que estudos comprovam que estas florestas manejadas capturam todo o  $\text{CO}_2$  emitido pelo processo de carbonização durante os seus ciclos de corte (Ferreira, 2000).

Ferreira (2000) quantificou as emissões e fixações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  no processo siderúrgico de produção de aço, considerando duas rotas: uma utilizando o carvão mineral e a outra o carvão vegetal. A rota a carvão mineral emitiu 1,65 t de  $\text{CO}_2$  e fixou 1,54 t de  $\text{O}_2$  por tonelada de aço produzido, enquanto a rota a carvão vegetal fixou 16,34 t de  $\text{CO}_2$  e emitiu 1,54 t de  $\text{O}_2$  por tonelada de aço produzido (da plantação do eucalipto até a produção do aço). O autor avaliou ainda a liberação de óxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), encontrando para a rota a carvão mineral a emissão de 7 kg de  $\text{SO}_2$ , emissão esta praticamente ausente na rota a carvão vegetal. Em resumo, ao se fazer uso de florestas plantadas para produzir carvão e aço, estamos colaborando para a redução do efeito estufa.

Entretanto, o processo de carbonização não é isento de poluição. Segundo Pimenta et al. (2000), os poluentes provenientes do processo de carbonização podem ser classificados em três grupos principais: materiais

particulados, gases não-condensáveis e compostos orgânicos condensáveis. O material particulado compõe-se de cinzas, partículas de carvão e fuligem arrastada do leito de carbonização dentro de microgotículas de alcatrão. Os gases não-condensáveis, por sua vez, são essencialmente compostos de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{CH}_4$ , enquanto os compostos orgânicos condensáveis são um grupo formado por compostos orgânicos agrupados em classes químicas variadas.

A fumaça de carbonização possui em sua constituição a capacidade de causar toxicidade. Egreja (1999), em sua tese, relatou que Kelsey et al. (1981) e Knoef et al. (1987) constataram o efeito tóxico em seres humanos, decorrente da inalação de substâncias emitidas durante o processo de carbonização da madeira, principalmente da fração pesada, como o alcatrão e outras substâncias. A maioria dos subprodutos tóxicos corresponde ao grupo dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e dos compostos orgânicos nitrogenados, que apresentam atividade mutagênica e cancerígena.

Pimenta et al. (2000) quantificaram os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos isolados a partir do licor pirolenhoso de *Eucalyptus grandis*, os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, e encontraram 14 dos 16 hidrocarbonetos policíclicos aromáticos incluídos na lista de poluentes prioritários da Agência Americana de Proteção Ambiental. Estes compostos, quando ministrados em ratos e cobaias de laboratório por ingestão, inalação ou por injeção via muscular, intravenosa ou subcutânea, induzem o aparecimento de diversos tipo de câncer.

A utilização de sistemas de recuperação ou queima de gases pode ser uma alternativa viável na redução ou eliminação da poluição (Almeida, 1982).

Os resultados obtidos por Mezzere (s.d.), mostrados no Quadro 1, demonstram a alta eficiência da incineração dos gases da

**Quadro 1** – Desempenho de um incinerador no controle das emissões do processo de carbonização  
**Table 1** – *Incinerator performance in controlling carbonization gas emissions*

Ponto de Prova	Antes do Incinerador	Depois do Incinerador
Concentração de poluentes ( $\text{mg Nm}^{-3} \text{h}^{-1}$ )	50.000	2
Saída de gases ( $\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$ )	550	5.700
Temperatura média ( $^{\circ}\text{C}$ )	90	430
Conteúdo de CO (% gases)	3	--
Conteúdo de CO <sub>2</sub> (% gases)	5	6
Conteúdo de O <sub>2</sub> (% gases)	15	15
Conteúdo de Nox (ppm)	--	40 - 55
Conteúdo total de hidrocarbonetos (ppm)	12.000	20 - 30

Fonte: Mezerette (s.d.).

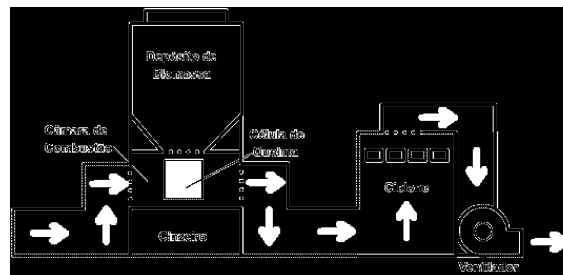
carbonização, além disto uma quantidade substancial de energia utilizável é produzida. Outro fator muito importante é que, com a instalação de sistemas de queima da fumaça, as condições de trabalho nas plantas de carbonização serão consideravelmente melhoradas. Os níveis de poluição são reduzidos a menos de 0,005%. Os hidrocarbonetos são reduzidos a 0,25% da sua quantidade original presente antes da queima da fumaça.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O forno utilizado para carbonização consistiu de um forno de ciclo semicontínuo tipo *container*, com capacidade para 1,5 estêreos de lenha. Algumas características deste forno são a de possuir um ciclo de carbonização entre 6 e 12 horas, rendimento gravimétrico médio superior a 30%, qualidade do carvão similar à dos sistemas tradicionais etc.

A fornalha utilizada para queima dos gases foi construída com base em uma fornalha utilizada para aquecimento direto de grãos e foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa-MG. Foi construída com tijolos comuns e refratários, areia lavada, terra, melaço de açúcar, brita, cimento, ferragens e chapas metálicas.

A célula de queima (Figura 1), com dimensões de 20 x 20 x 20 cm, foi construída com vergalhões de 20 mm de diâmetro. A célula de queima localizava-se no centro da câmara de combustão, que foi revestida no seu interior com tijolo refratário, possuindo volume útil de 0,1 m<sup>3</sup>. Acima da célula de queima estava o depósito de biomassa, que abastecia a célula de queima por gravidade à medida que o combustível era queimado. A fornalha possuía, ainda, um cinzeiro abaixo da célula de queima, para retirada das cinzas; um ciclone, para o resfriamento dos gases; e um ventilador centrífugo (50 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>), para succionamento do ar ou dos gases da carbonização.



**Figura 1** – Esquema da fornalha com indicação do fluxo dos gases.

**Figure 1** – *Furnace outline showing gas flow.*

A fornalha geralmente utiliza o carvão vegetal como combustível, em granulometria média de 30 cm<sup>3</sup>, podendo-se utilizar outros materiais desde que se mantenha esta granulometria (Silva, 2000). Em testes preliminares foram avaliados outros combustíveis, como lenha picada e casca, e ambos foram consumidos na fornalha sem qualquer inconveniente.

## 2.1 Medição da temperatura

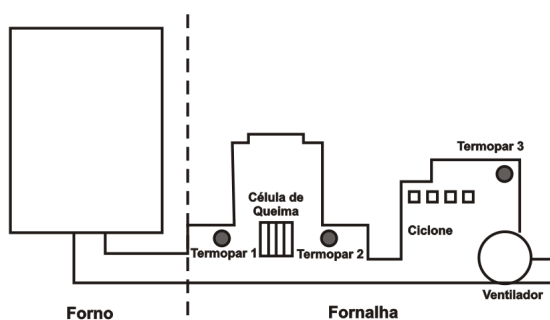
Na fornalha foram utilizados três termopares tipo K (até 1.280 °C), um antes da célula de queima (termopar 1), outro após a célula de queima (termopar 2) e outro depois do ciclone (termopar 3), após o resfriamento do ar.

Os termopares foram conectados a um sistema de aquisição de dados, e os registros de temperatura foram coletados em intervalos regulares de 15 minutos. A Figura 2 ilustra o posicionamento dos termopares na fornalha e no forno *container*.

## 2.2 Balanço de massa e energia

### 2.2.1 Determinação do poder calorífico da lenha

O poder calorífico superior da lenha de eucalipto utilizado foi de 4700 kcal kg<sup>-1</sup>,



**Figura 2** – Posicionamento dos termopares na fornalha.

**Figure 2** – Positioning of the temperature meters in the furnace.

conforme dados históricos obtidos no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira. O poder calorífico da lenha na umidade de trabalho foi calculado pela equação 1:

$$PCU = PCS - (49,7 * U) \quad [\text{eq. 1}]$$

em que  $PCU$  = poder calorífico útil da madeira na umidade de trabalho em kcal kg<sup>-1</sup>;  $PCS$  = poder calorífico superior da madeira de eucalipto = 4700 kcal kg<sup>-1</sup>; e  $U$  = umidade da madeira, em%.

### 2.2.2 Determinação do poder calorífico do carvão

Fez-se uso da análise química do carvão para estimar o poder calorífico do carvão resultante.

A equação 2 foi utilizada para determinação do PCS (Oliveira et al., 1982):

$$PCS = (82CF + a.MV) \quad [\text{eq. 2}]$$

em que  $PCS$  = poder calorífico superior, em cal g<sup>-1</sup> ou kcal kg<sup>-1</sup>;  $CF$  = teor de carbono fixo, em%;  $MV$  = teor de matérias voláteis, em%; e  $a$  = coeficiente dependente da qualidade do combustível, adimensional.

O poder calorífico na umidade de trabalho foi calculado pela equação 3:

$$PCI = PCS - 600 (9 \times H_2 \times U) \quad [\text{eq. 3}]$$

em que  $PCI$  = poder calorífico do carvão na umidade de trabalho, em kcal kg<sup>-1</sup>;  $H_2$  = teor de hidrogênio em kg H<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de combustível = 0,038;  $U$  = umidade do carvão, kg H<sub>2</sub>O kg<sup>-1</sup> de carvão; e  $PCS$  = poder calorífico superior do carvão em kcal kg<sup>-1</sup>.

O cálculo do balanço de massa e energia do sistema foi realizado, considerando a média de dez carbonizações feitas no forno *container*. O balanço de energia consistiu na simples multiplicação do poder calorífico dos combustíveis na umidade de trabalho em kcal kg<sup>-1</sup> pela massa total em kg dos

combustíveis iniciais (madeira), resultantes (carvão) e consumidos (combustível da fornalha) no processo de carbonização.

**Quadro 2** – Coeficientes de **a** em função do teor de voláteis e carbono fixo da madeira

**Table 2** – Coefficients of **a** in function of volatile and fixed carbon content of wood

$\frac{MV}{MV+CF}$	<b>a</b>
0,05	150
0,05	145
0,10	130
0,15	117
0,20	109
0,25	103
0,30	96
0,35	89
0,40	80

Fonte: CETEC (1982).

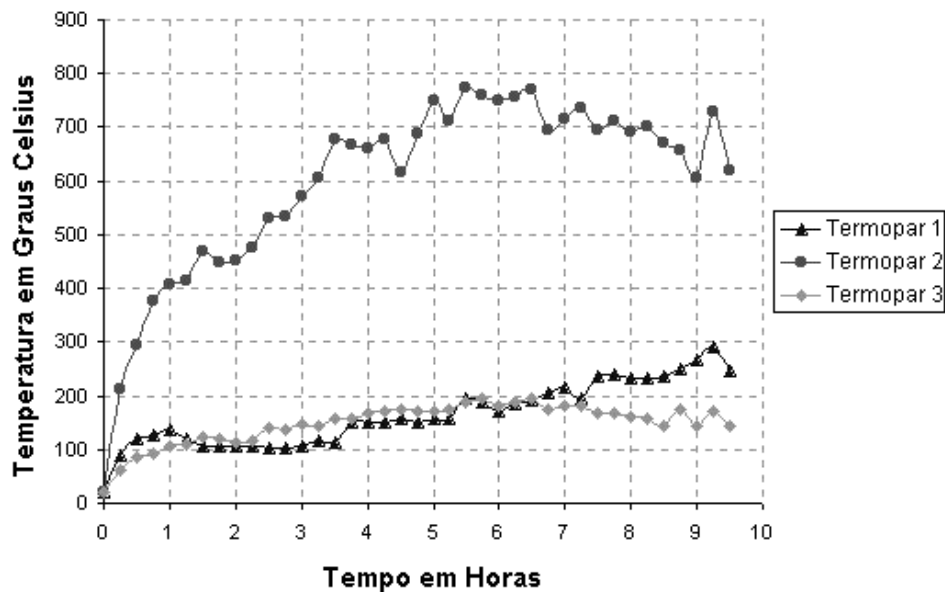
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A chaminé de saída do forno *container* foi conectada à câmara de combustão da fornalha. A fumaça exaurida passava pela câmara de combustão da fornalha, onde era queimada. O tempo médio de carbonização foi de 9h25.

A Figura 3 ilustra a evolução da temperatura ao longo do tempo, em três diferentes pontos da fornalha.

No termopar 1 (antes da célula de queima) tinha-se a evolução da temperatura do gás que entrava na câmara de combustão da fornalha. A temperatura do gás iniciava-se a temperaturas próximas à temperatura ambiente (hora zero), elevando-se ao longo da carbonização até temperaturas próximas a 300 °C no término do processo.

No termopar 2 a temperatura média após a célula de queima foi superior aos 700 °C,



**Figura 3** – Temperatura média dos termopares ao longo do tempo.  
**Figure 3** – Mean temperature of the temperature meters over time.

principalmente após a quarta hora de carbonização, quando a fornalha atingia o regime permanente de trabalho. Espera-se que com esta temperatura ocorra a queima total dos gases, principalmente dos compostos fenólicos, que podem ser prejudiciais à saúde humana. O objetivo da queima é ter, ao final do processo, apenas  $\text{CO}_2$ , dado este que necessita de comprovação científica, utilizando-se para tal um analisador de gás ou outro equipamento equivalente.

No termopar 3 (após resfriamento), a temperatura do gás de saída variou, em quase todo o processo, entre 100 e 200 °C, com uma temperatura média de 143 °C.

A primeira fase da carbonização, a fase de secagem, coincidia com o período em que a fornalha estava sendo aquecida, fato este que ocasionava um consumo elevado de combustível nas primeiras 4 horas e impedia a queima total da fumaça.

A partir da quarta hora o poder calorífico do gás da carbonização aumentava de maneira significativa, propiciando um excedente de energia que reduzia o consumo de combustível na fornalha a níveis mínimos; queimava-se apenas o suficiente para se manter uma “chama piloto”.

Nas duas últimas horas de carbonização, o combustível da fornalha tornava-se desnecessário, pois o gás da carbonização se inflamava com o próprio calor armazenado no refratário da câmara de combustão, reduzindo o consumo de combustível da fornalha a zero.

Conforme o Quadro 1, um queimador avaliado por Mezerette (s.d.) apresentou temperatura média de entrada do gás de 90 °C e a de saída, após a queima do gás, de 410 °C. A fornalha celular apresentou melhor aproveitamento da energia: a média da temperatura de entrada do gás foi de 185 °C e a de saída superior aos 630 °C. Contudo, esse resultado leva em consideração a fase de aquecimento

da fornalha, pois se esta fase for desconsiderada serão obtidas temperaturas de saída superiores aos 700 °C. Temperaturas mais elevadas indicam melhor queima da fumaça, logo, espera-se que a fornalha celular apresente maior eficiência no controle da poluição do que o queimador apresentado por Mezerette (s.d.), sendo necessários estudos adicionais que comprovem esta afirmação.

### 3.1 Balanço de massa e energia

O balanço de massa e energia tem o objetivo de verificar o equilíbrio da conversão da massa em energia. A partir dos resultados podem ser avaliadas a eficiência do sistema, as suas perdas e as possibilidades de uso.

Esse balanço foi realizado com o objetivo de verificar quanta energia pode ser aproveitada na forma de calor, ao se fazer o controle da poluição da carbonização de 1 tonelada de madeira.

Conforme pode-se constatar no Quadro 3, ao final do processo têm-se um pouco mais de 53% da energia inicial prevista, na forma de carvão. Os outros 47% da energia inicial estão sendo perdidos, e grande parte deste “desperdício” pode ser aproveitado.

Se for considerado um aproveitamento de 50%, nas perdas e nos excedentes do processo (Quadro 3) será obtido o equivalente a 562.062,76 kcal de energia disponível para uso. Se for considerada uma eficiência de 25% na conversão vapor → mecânica (Brasil, 1982) e de 80% na conversão mecânica → elétrica (Brasil, 1982), serão obtidas 112.412,55 kcal, o que é equivalente a 130.398,56 W, uma quantidade significativa de energia

Essa quantidade de energia que não está sendo aproveitada necessita ser utilizada. É interessante que se façam estudos que visem o aproveitamento deste excedente de energia para secagem de madeira ou outros produtos e para o aquecimento de caldeiras na geração de vapor para turbinas elétricas.



**Quadro 3** – Balanço de massa e energia dos combustíveis utilizados e resultantes do processo de carbonização com forno *container* em conjunto com a fornalha celular, para uma tonelada de lenha em base úmida\*\*

**Table 3** – *Mass and energy balance of the fuels utilized resulting from carbonization using container type oven combined with cellular furnace for one ton of firewood at a humid base\*\**

Tipo	Massa (kg)		PCI (kcal kg <sup>-1</sup> )	Energia (kcal) (Massa x PCI)		Energia (%) (Massa x PCI)	
	Entrada	Saída		Entrada	Saída	Entrada	Saída
Madeira	1.000,00	-	2.045,15	2.045.000,00	-	84,58	-
Combustível da fornalha	53,64	-	6.951,57	372.882,21	-	15,42	-
Carvão	-	186,11	6.951,57	-	1.293.756,69	-	53,50
Perdas e excedente*	-	-	-	-	1.124.125,52	-	46,50

\*\* Umidade utilizada = umidade média do experimento = 41% BS.

#### 4 CONCLUSÕES

A utilização da fornalha celular para o controle da poluição em fornos tipo *container* mostrou-se muito eficiente, gerando um grande potencial energético, de forma que se propõem:

Estudos com a utilização de secadores, caldeiras e turbinas, entre outros equipamentos, como opções de aproveitamento do excesso de energia que a queima dos gases da carbonização oferece.

Determinação mais precisa, com a utilização de um analisador de gás, dos compostos químicos que estão sendo liberados na atmosfera, provenientes da queima do gás de carbonização, ao longo do processo de fabricação do carvão.

#### 5 AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa de mestrado concedida ao Daniel Camara Barcellos; e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico) e ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café – CBP&D – Café, pelo financiamento do projeto.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M. R. **Recuperação de alcatrão em fornos de alvenaria**. In: Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, 1982. 393 p.
- ALVIM, C. F. et al. A energia primária, final, útil e equivalente e atividade econômica. **Econ. Energia**, v. 3, set., out. <http://ecen.com/eee16/enerequi.htm>.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional - BEN 2000**. Brasília: 2000. 154 p.
- EGREJA, C. M. **Produção de adesivos fenólicos a partir do creosoto vegetal desmetilado**. 1999. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.
- FERREIRA, L. H. C. **Desenvolvimento de uma retorta metálica para carbonização de madeira**. 1988. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.
- FERREIRA, O. C. Emissão de gases de efeito estufa na produção e consumo do carvão vegetal. **Economia e Energia**, v. 3, set./out. Disponível em: <<http://ecen.com/eee21/emiscar.htm>>. Acesso em: 1 ago. 2000.

- OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. **Propriedades do carvão vegetal**. In: Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, controle de qualidade. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, 1982. 173 p.
- PIMENTA, A. S. et al. Evaluation of acute toxicity and genotoxicity of liquid products from pyrolysis of *Eucalyptus grandis* wood. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 38, p.169-175, 2000.
- PINHEIRO P. C. C.; SAMPAIO. Fornos de carbonização utilizados no Brasil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE USO DA BIOMASSA PLANTADA PARA PRODUÇÃO DE METAIS E GERAÇÃO DE ELETRICIDADE, Belo Horizonte-MG. **Anais...** Belo Horizonte: 2001. CD-ROM.
- SEYE, O.; PINHEIRO, P. C. C. Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE USO DA BIOMASSA PLANTADA PARA PRODUÇÃO DE METAIS E GERAÇÃO DE ELETRICIDADE, 1., 2001. Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2001. CD-ROM.
- SILVA, I. D. **Projeto, construção e teste de uma fornalha a carvão vegetal para secagem de café**. 1998. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.
- SILVA, J. S.; PRECCI, R. L.; MACHADO, M. C. **Fornalha a carvão vegetal para secagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais/UFV, 2000. 24 p.
- VALENTE, A. F. Carbonização de madeira de eucalipto. **Informe Agropecuário**, v. 141, p. 74-79, 1986.