

# UM MÉTODO OBJETIVO PARA O CONTROLE DA CARBONIZAÇÃO UTILIZANDO UM FORNO DE CICLO SEMICONTÍNUO TIPO "CONTAINER" PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL<sup>1</sup>

*An Objective Method for Carbonization Control Using a Container Type, Semicontinuous Cycle Oven for Charcoal Production*

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

**Resumo:** Os objetivos deste trabalho foram estabelecer o perfil térmico médio do sistema forno *container*, ajustar uma equação que explique o comportamento da temperatura ao longo do tempo e possibilitar a determinação do fim da carbonização a partir da temperatura dos gases da carbonização. Os resultados demonstraram que a condução da carbonização pode ser feita de maneira objetiva, através do uso de sensores térmicos, e que os modelos ajustados servem de instrumento de decisão no controle do processo.

**Palavras-chave:** Controle da carbonização, forno *container* e forno de carvão.

**Abstract:** This work aimed to establish the average thermal profile of a container oven system, to adjust an equation to explain temperature behavior over time and to allow determination of end of carbonization based on carbonization gas temperatures. The results obtained showed that carbonization can be achieved objectively through the use of thermal sensors and that the adjusted models can be decision tools in the process control.

**Key words:** Carbonization control, container oven and charcoal oven.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Valente (1986), há uma discrepância tecnológica no sentido de que a tecnologia de produção de carvão vegetal evoluiu muito pouco no País, apesar de antiga, em comparação com o grande avanço alcançado pela produção de gusa.

O Brasil é o maior produtor de carvão vegetal do mundo, tendo produzido, em 1999, 6,4 milhões de toneladas métricas (26,9 milhões de m<sup>3</sup>), 25% da produção mundial. Deste total, 75% correspondente ao carvão oriundo de madeira de reflorestamentos, sendo o eucalipto utilizado em 52% das florestas plantadas no Brasil. Oitenta e seis

<sup>1</sup> Recebido para publicação em 23.7.2004 e aceito em 28.8.2004.

<sup>2</sup> Doutorando em ciência Florestal do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa – DEF/UFV, <camara@uai.com.br>; <sup>3</sup> Prof. do Departamento de Engenharia Florestal – DEF/UFV; <sup>4</sup> D.S., Prof. do Departamento de Engenharia Agrícola – DEA/UFV; <sup>5</sup> Ph.D., Prof. da Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA.

porcento do carvão vegetal produzido é utilizado no setor industrial, na fabricação de ferro-gusa e aço (4,7Mt), ferro-ligas (0,56Mt) e cimento (0,24Mt). O setor residencial consome 9% e o setor comercial (pizzarias, padarias e churrascarias), 1,5% (Pinheiro & Sampaio, 2001).

Conforme Medeiros & Rezende (1983), o processo de carbonização pode ser dividido em quatro fases distintas:

Abaixo de 200 °C – Secagem e início da decomposição térmica da madeira.

De 200 a 280 °C – Fase predominantemente endotérmica, com liberação de ácido acético, metanol, água, CO<sub>2</sub> etc.

De 280 a 500 °C – Fase predominantemente exotérmica, onde é formada a maior parte dos alcatrões e dos gases combustíveis (CO, CH<sub>4</sub> etc.).

Acima de 500 °C – O carvão já é bem estável e apenas pequenas quantidades de voláteis, principalmente H<sub>2</sub>, são liberadas.

Apesar do conhecimento das fases da carbonização, os sistemas de fabricação de carvão vegetal não fazem uso de sensores térmicos para o monitoramento do processo. A maior parte do carvão produzido no Brasil é proveniente de fornos de alvenaria, nos quais não há controle da temperatura de carbonização nem a recuperação/eliminação dos produtos voláteis, que são lançados na atmosfera (Silva, 1998, citando Almeida 1983; Vella, 1989).

Em alguns países da América Latina, como a Nicarágua, o sistema dominante de carbonização são os fornos de terra, que podem ser considerados como o sistema mais empírico de carbonização. O rendimento em carvão é inferior a 20%, além de apresentar um carvão de baixa qualidade, misturado com terra e outros materiais. Eles estão inclusos no grupo de fornos que utilizam fonte interna de calor, chamados de medas ou caieira,

assim como os de alvenaria e os metálicos tipo Mark (Bastos Filho, 1986).

Em geral, o controle da carbonização nos fornos depende unicamente da experiência do carvoeiro. A operação de carbonização nestes fornos é realizada de forma empírica, sem fundamentos científicos, e é baseada principalmente no conhecimento obtido pelo operador através da tentativa e erro. Existe uma dificuldade em se padronizar a rotina de carbonização em fornos de alvenaria, devido ao grande número de variáveis envolvidas. As baixas eficiências obtidas na prática podem ser aumentadas consideravelmente através do aperfeiçoamento dos fornos existentes e do treinamento dos operadores (Pinheiro & Sampaio, 2001).

O forno *container* pode ser considerado um sistema conjugado que reúne a vantagem do bom isolamento térmico dos fornos de alvenaria e o rápido resfriamento dos fornos metálicos.

Os modelos de fornos *containers* construídos até agora mostraram que este tipo de forno possui promissoras vantagens, quando comparados aos sistemas tradicionais:

1. Durabilidade, não necessitando de reparos contínuos como os fornos de alvenaria tradicionais.
2. Rápido resfriamento do carvão vegetal (12 horas), contra três a quatro dias nos sistemas convencionais.
3. A carga de lenha e descarga do carvão podem ser mecanizadas.
4. Humaniza o trabalho nas carvoarias, porque a carbonização dura de 6-12 horas, o trabalho pode ser organizado em turnos e o operador não necessita ficar vigiando a carbonização dia e noite. Além disto, os trabalhadores não ficam expostos à inalação das emissões poluentes.
5. O controle da carbonização pode ser feito por temperatura, e não por coloração de

- fumaças e outros critérios subjetivos, o que facilita o treinamento dos carvoeiros.
6. A descarga mecanizada do carvão reduz a emissão de finos, contribuindo para um ambiente de trabalho mais saudável.
  7. É obtido carvão de boa qualidade no forno *container*, apresentando o produto as mesmas propriedades (composição química, densidade, resistência mecânica, poder calorífico etc.) do carvão produzido em fornos de alvenaria ou retorta de laboratório, com a vantagem de que no forno *container* não são incorporados minerais estranhos (pedras e terra), como ocorre durante o manuseio do carvão em carvoarias tradicionais.
  8. Podem ser obtidos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal na faixa de 28 a 38%, contra os 25 a 33% nos fornos de alvenaria tradicionais.
  9. O alcatrão vegetal e os pirolenhosos podem ser recuperados, utilizando-se o sistema de condensação. Caso não seja de interesse preparar o alcatrão, as fumaças do leito de carbonização podem ser conduzidas a um queimador e incineradas, gerando calor sensível, que pode ser aproveitado para geração de vapor ou secagem de lenha.
  10. O treinamento de mão-de-obra e a padronização de atividade são facilitados porque a operação de fornos se baseia em leitura instrumental (indicação de temperatura), e não em critérios subjetivos. Este fato possibilita o estabelecimento de rotinas de trabalho mais uniformes e padronizadas, indo de encontro aos princípios de qualidade total.
  11. Elevada produtividade – dois a três ciclos diários contra um ciclo semanal dos sistemas tradicionais.

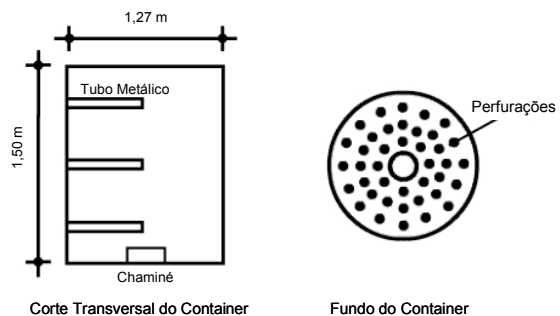
Considerando a forma subjetiva como é realizado o processo de carbonização atual e

as vantagens que o forno *container* oferece, o presente trabalho teve os objetivos de estabelecer o perfil térmico do sistema forno *container*, ajustar uma equação que explique o comportamento da temperatura ao longo do tempo e possibilitar a determinação do fim da carbonização a partir da temperatura dos gases da carbonização.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O forno construído para o presente experimento consiste das seguintes partes: *container* metálico, poço isolante, sistema de movimentação e descarga (Ferreira, 1988), sistema de exaustão de gases e fornalha para queima da fumaça.

Nas paredes laterais do *container* metálico foram fixados, a 25, 75 e 125 cm de altura, três tubos metálicos, que permitiram a introdução de termopares até o centro do *container*. Na Figura 1 está o esquema de um corte lateral do *container*.



**Figura 1** – Corte lateral e vista do fundo do container.

**Figure 1** – Lateral cut and view of bottom of container.

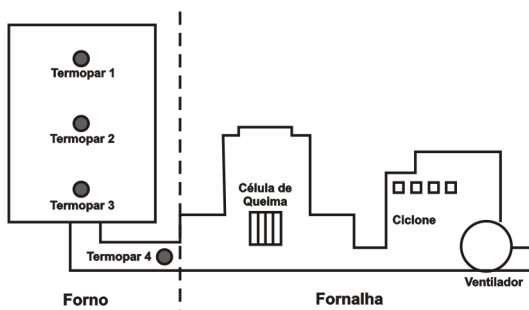
### 2.1 Medição da temperatura

No interior do forno container foram utilizados termopares tipo K (temperaturas até 1.260 °C) de haste longa, que eram posicionados no centro do *container* durante a carbonização nas alturas de 1,25 m (termopar

1), 0,75 m (termopar 2) e 0,25 m (termopar 3). O termopar 4 foi colocado na chaminé do forno a 1,3 m da saída central dos gases do *container*.

À medida que a carbonização ocorria, a fumaça da carbonização era conduzida até a fornalha celular (Silva, 1998), onde era queimada.

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*.



**Figura 2** – Posicionamento dos termopares no forno.

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

Os resultados foram obtidos a partir da repetição de nove carbonizações com a lenha, apresentando as seguintes características:

Espécie: *Eucalyptus* sp.

Umidade :  $41,05 \pm 8,01$ .

Densidade:  $0,50 \pm 0,02$ .

Diâmetro médio :  $11,41 \pm 2,68$ .

Comprimento médio:  $1,40 \pm 0,10$ .

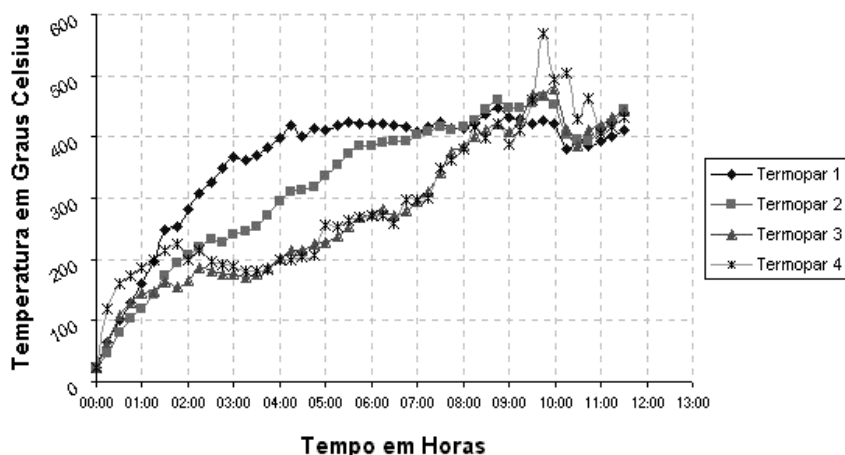
### 2.1.1 Determinação do perfil térmico

O perfil térmico foi criado com o auxílio do *software* SURFER 7.0, versão demonstrativa. O princípio do *software* consiste em plotar os valores das temperaturas (z) nas posições das leituras (x e y) no tempo (h). Definidas as coordenadas e os valores de temperatura, criou-se uma escala de cores, correlacionando-as com a temperatura.

## 3 RESULTADOS

Conforme mostra a Figura 3, durante a carbonização foram observadas quatro fases distintas:

Primeira fase (00:00-02:00 horas). Esta fase foi marcada pelo aquecimento da carga



**Figura 3** – Evolução da temperatura ao longo do tempo nos diferentes termopares.

**Figure 3** – Temperature evolution over time for the different temperature meters.

de lenha contida no *container* pela queima de combustível na câmara de combustão do forno. Os três termopares colocados dentro do *container* indicaram uma taxa de aquecimento muito parecida, apresentando todas temperaturas muito próximas. Foi observado que a temperatura obtida na chaminé do forno foi superior à dos demais termopares, o que pode ser explicado pelo fato de parte da energia da queima do combustível está sendo perdida pela exaustão forçada dos gases.

Segunda fase (02:00-08:00 horas) - Nesta fase foi formado um gradiente de temperatura que ficou evidente até a sétima hora. A partir da oitava hora este gradiente praticamente desapareceu e as temperaturas nos termopares do forno e chaminé praticamente se igualaram.

Terceira fase (09:00-10:00 horas) - Nesta etapa ocorreu a inversão do gradiente de temperatura. Esta inversão indicou que a frente de carbonização havia chegado à posição mais baixa do *container*, evidenciando o fim do processo de carbonização.

Quarta fase (a partir de 10:00 horas) - Nesta fase ocorreu a contração do carvão com sua subsequente queima, resultando em perda de rendimento em carvão. Ocorreu uma leve redução da temperatura média do leito de carbonização, com a consequente tendência a aumento da mesma até temperaturas próximas à temperatura de combustão

(800-1200 °C), caso o processo não fosse interrompido.

### 3.1 Correlação entre os termopares

O objetivo de fazer uma correlação com os termopares é de monitorar e controlar a carbonização a partir de um único termopar.

O termopar 4 foi escolhido para ser o termopar de monitoramento e controle por ser o de mais fácil instalação no forno e por representar bem a temperatura de término da carbonização.

Os coeficientes de correlação entre o termopar 4 e os demais termopares estão apresentados no Quadro 1. A correlação com o termopar 3 que determinava que a frente de carbonização chegou na parte inferior do *container*, indicando o fim do processo, foi bastante alta.

Se a temperatura no termopar 4 estiver, por exemplo, em 470 °C, será obtida, através da equação do Quadro 1 para o termopar 3, uma temperatura aproximada de 452 °C, que pode vir a ser definida como a temperatura final de trabalho. Oliveira et al. (1982) afirmaram que o maior rendimento em carvão é obtido através da temperatura média final entre 400 e 500 °C. Porém esta temperatura, bem como o tempo de reação a esta temperatura, depende de outras variáveis, como teor de umidade, densidade e diâmetro da lenha, que precisam ser mais bem estudadas, a fim de otimizar o rendimento no processo.

**Quadro 1** - Correlação entre o termopar 4 e os demais termopares

**Table 1** - Correlation between temperature meter 4 and the others

Especificação	Termopar 1	Termopar 2	Termopar 3	Média
Coefficiente de Correlação	0,62	0,84	0,97	0,86
Desvio-Padrão	84,11	67,29	30,03	57,05
Equação	Y = a + bx a = 194,98 b = 0,5575	Y = a + bx a = 70,36 b = 0,8653	Y = a + bx a = -11,16 b = 0,9865	Y = a + bx a = 84,55 b = 0,8035

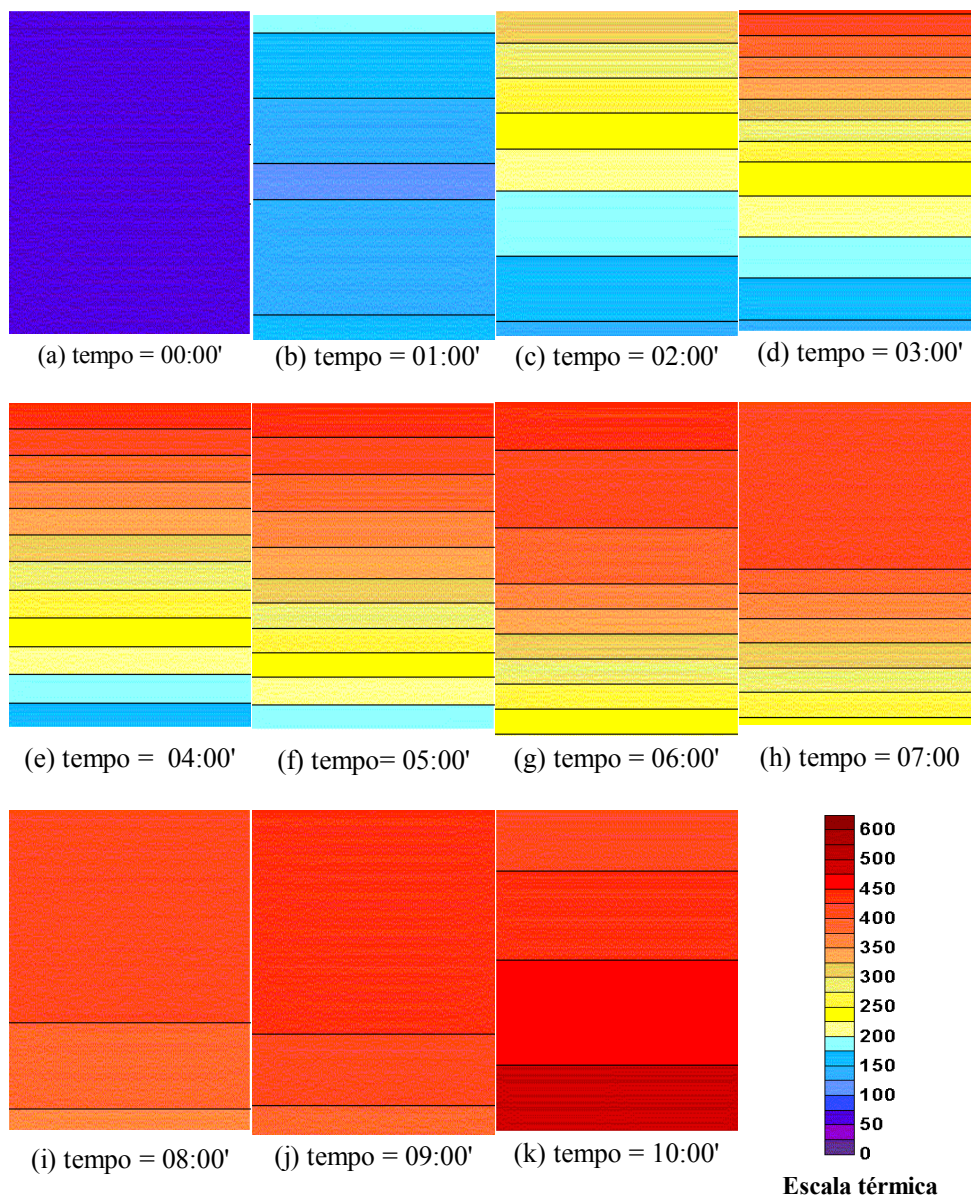


### 3.2 Perfil térmico do forno durante a carbonização

A Figura 4 representa o comportamento da carbonização ao longo do tempo e posição no forno.

No tempo zero (Figura 4a), o forno se encontrava em temperatura ambiente.

Nas duas primeiras horas (Figura 4b e 4c), o *container* sofria aquecimento proveniente da queima de combustível na câmara



**Figura 4** – Representação gráfica do comportamento da temperatura dentro do *container*, ao longo do tempo.

**Figure 4** – Graphic representation of temperature behavior inside the container over time.

de combustão. A partir da segunda hora o sistema entrava em regime exotérmico, não sendo mais necessária a introdução de calor e oxigênio em excesso, formou-se um gradiente de temperatura em que tínhamos temperaturas mais elevadas na parte superior do *container* e temperaturas mais baixas na sua parte inferior (Figura 4d).

À medida que a carbonização ocorria, os gases quentes subiam e a fumaça descia, sendo succionada pela chaminé. Formava-se então uma frente de carbonização na parte superior do *container*, com temperatura próxima aos 400 °C (Figura 4d).

Da quarta até a sétima hora (Figuras 4e a 4h), a frente de carbonização descia, primeiro secando a lenha e depois pirolisando-a.

Na oitava e nona hora (Figuras 4i e j), o *container* apresentava, em todas as suas posições, temperaturas próximas aos 400 °C, não se evidenciando gradientes de temperatura.

Na décima hora (Figura 4k) ocorria uma inversão do gradiente de temperatura. A parte inferior do *container* apresentava

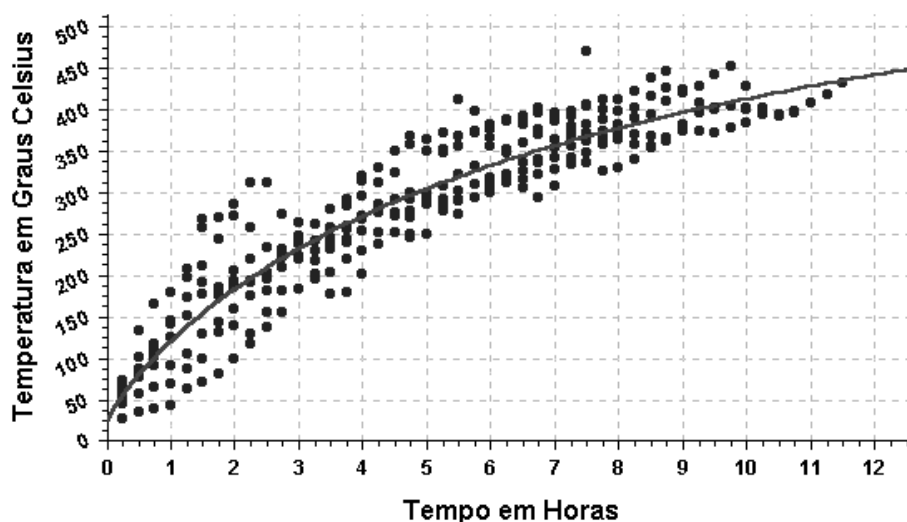
temperatura mais elevada que a sua parte superior, indicando a proximidade do fim da carbonização. Entretanto, o fim da carbonização dependia de outras variáveis, principalmente variáveis da matéria-prima, ou seja, da madeira. Carbonizações em que a lenha possuía maior densidade, umidade ou diâmetro necessitavam de maior tempo de exposição à temperatura final de carbonização (400-500 °C).

### 3.3 Ajuste de equação - evolução da temperatura média

O modelo que melhor representou as carbonizações efetuadas foi o sigmoidal, apresentado na equação 1:

$$y = \frac{ab + cx^d}{b + x^d} \quad [\text{eq. 1}]$$

em que  $y$  = temperatura em graus Celsius;  $x$  = tempo em horas; e  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  = coeficientes. ( $a = 25,59$ ;  $b = 6,48$ ;  $c = 741,10$ ; e  $d = 0,8852$ ). Erro-padrão: 37,38; e coeficiente de correlação: 0,9431.



**Figura 5** – Evolução média da temperatura ao longo do tempo.  
**Figure 5** – Mean evolution of temperature over time.

Um carbonizador pode, a partir dessa equação, considerando as condições do experimento (lenha de eucalipto com  $41 \pm 8\%$ , densidade básica de  $0,51 \pm 0,03 \text{ g cm}^{-3}$ , comprimento médio da lenha de 1,4 m e diâmetro médio de  $11,41 \pm 2,68 \text{ cm}$ ), acompanhar a evolução da temperatura ao longo do tempo. Por exemplo, se no tempo de 4h15 a temperatura média de carbonização for diferente do intervalo obtido pela equação 1 ( $280 \pm 37 \text{ }^\circ\text{C}$ ), é um indício de que a carbonização foi alterada, sendo necessário verificar a causa desta alteração (matéria-prima, equipamento ou processo) e se essa alteração prejudica o produto final (carvão). Caso a resposta seja afirmativa, o carbonizador deve tomar as providências para corrigir ou, pelo menos, amenizar a causa do problema.

#### 4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

O fim da carbonização pode ser determinado através da temperatura dos gases de carbonização. Estudos adicionais necessitam ser feitos para avaliar o tempo ótimo que as variáveis da madeira (diâmetro, densidade e umidade) devem ficar expostas à temperatura média final de carbonização ( $400\text{-}500 \text{ }^\circ\text{C}$ ), de forma a obter o máximo de rendimento no processo, sem prejudicar a qualidade do carvão.

A temperatura média de carbonização ao longo do tempo pode ser acompanhada através do modelo matemático sigmoideal ajustado, servindo como um instrumento de tomada de decisão.

O perfil térmico pode ser um método de interpretação do comportamento da carbonização. Entretanto, estudos adicionais devem ser realizados de forma a elaborar o perfil térmico que avalie também o gradiente de temperatura entre o centro do *container* e a sua periferia, representando com mais detalhes o que ocorre dentro do leito de carbonização.

Os modelos encontrados são válidos para as condições do experimento. Outros modelos provavelmente serão encontrados ao variar as condições do experimento (espécie, umidade, densidade e diâmetro da lenha), sendo necessária a aplicação de teste de identidade de modelos.

#### 5 AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa de mestrado concedida a 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.

#### REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CARVÃO VEGETAL – ABRACAVE. *Anuário estatístico*, 2000. Disponível em: <<http://www.abracave.com.br>>. Acesso em: 01 ago. 2000.

BASTOS FILHO, J. G. **Desenvolvimento e teste de um forno metálico para carbonização de madeira**. 1988. 37 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.

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, 1988.

MARRI, A. et al. **Manual de construção e operação de fornos de carbonização**. Belo Horizonte, Fundo Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, 1982. 55 p.

MEDEIROS, C.A.; REZENDE, M. E. A. Alcatrão vegetal; perspectivas de produção e utilização. *Revista Fundação João Pinheiro*, v. 13, n. 9-12, p. 42-48, 1983.

OLIVEIRA, J. B.; VIVACQUA FILHO, A.; GOMES, P. A. Produção de carvão vegetal - aspectos técnicos. In: **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. 1982. 393 p.



PINHEIRO P. C. C.; SAMPAIO, R. S. **Fornos de carbonização utilizados no Brasil.** 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.

ROCHA, J. D. et al. Banco de dados de biomassa online. 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.** 1988. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.

VALENTE, A. F. Carbonização de madeira de eucalipto. **Informe Agropecuário**, v. 141, p. 74-79, 1986.

VELLA, M. M. C. F. **Influência da velocidade de carbonização da madeira nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido.** 1989. 53 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1989.