

TATIANA PAULA MARQUES DE ARRUDA

**AVALIAÇÃO DE DUAS ROTINAS DE CARBONIZAÇÃO EM FORNOS  
RETANGULARES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2005

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

A779a Arruda, Tatiana Paula Marques de, 1978-  
2005 Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos  
retangulares / Tatiana Paula Marques de Arruda. – Viçosa :  
UFV, 2005.  
x, 44f. : il. ; 29cm.

Orientador: Alexandre Santos Pimenta  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 42-44

1. Fornos de carbonização de madeiras. 2. Carvão  
vegetal - Produção. 3. Energia de biomassa. I. Universidade  
Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.983982

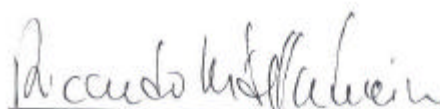
TATIANA PAULA MARQUES DE ARRUDA

**AVALIAÇÃO DE DUAS ROTINAS DE CARBONIZAÇÃO EM FORNOS  
RETANGULARES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.


Aprovada: 23 de fevereiro de 2005.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Benedito Rocha Vital  
(Conselheiro)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Ricardo Marius Della Lucia  
(Conselheiro)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. José de Castro Silva

  
\_\_\_\_\_  
Pesq. Ana Márcia M. L. Carvalho

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Alexandre Santos Pimenta  
(Orientador)

A minha família, especialmente a minha mãe, Rogina Marques de Arruda,  
e ao meu tio, Dergan Antônio Baracat;  
Aos meus irmãos, Rondenelly, Ronaldo e Laura;  
Ao meu sobrinho, Pedro Augusto.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pela vida, força e coragem.

A minha mãe, Rogina Marques de Arruda, pelo incentivo, dedicação, carinho, atenção e amor.

Ao meu tio, Dergan Antônio Baracat, pelo incentivo, carinho e confiança depositada em meu trabalho.

Aos meus irmãos, Rondenelly César Marques de Arruda, Ronaldo Adriano Marques de Arruda e Laura Antônia Marques de Arruda, pelo incentivo, apoio e compreensão.

À Universidade Federal de Viçosa e ao programa da Pós-graduação, pela oportunidade de realização deste trabalho.

À CAPES (Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa de estudo.

Ao Professor Alexandre Santos Pimenta, pelos conhecimentos fornecidos.

À empresa Ferro Gusa Carajás (FGC), pelo apoio físico e financeiro.

Aos membros da banca examinadora, pelas sugestões.

À equipe de campo, José Augusto, Antônio Diomar, Medeiros, Valmir, Evandro, Francisco, James, José Ferreira, José Ribamar, Antonio, Raimundo, Irismar, Fernando, Edivan, Francisco Santos, Jairo, Eliésio; Jailton, Daniel, Dílson, Toinho Surdo, Tico e Sansão, pelo apoio, auxílio na montagem, preparação e coleta de dados.

À equipe de laboratório da empresa, Josely, Cleuberth e Gervânio, pelas análises de laboratório.

Aos colegas, Jared, Gilson, Albertina, Érika, Silas Zen, Geraldo, Terezinha, Christopher e Luiz Guilherme, pelo apoio, incentivo, atenção, recursos de materiais, assistência técnica em informática e auxílio na operação dos equipamentos.

Ao técnico do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, José Aristeu pela realização da análise do poder calorífico do carvão.

As minhas amigas da república, Miranda e Renata pelo apoio, incentivo, carinho e compreensão.

Aos meus amigos, Solange, Rosalvo, Fabiana, Andréa, Marcinho, Bruno, Claudinha, Alécia, Fernando, Prof<sup>o</sup>. Hércio, Suely, Catarina, Cícero, Vanda, Lalado, pelos conselhos, incentivo, carinho, atenção e companheirismo e a amiga Ana Paula pelo auxílio na formatação da tese.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Florestal da UFV, pelos conhecimentos fornecidos.

A todos os funcionários do DEF, especialmente Ritinha e Fred, e a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

Tatiana Paula Marques de Arruda, filha de Paulo César de Arruda e Rogina Marques de Arruda, nasceu em 30 de março de 1978, em Corumbá, MS.

Em 1992, concluiu o primeiro grau na Escola de Primeiro e Segundo Graus “Couto Magalhães”, em Várzea Grande, MT.

Em 1995, concluiu o segundo grau em Técnico em Administração de Empresa na Escola de Primeiro e Segundo Graus “Couto Magalhães”, em Várzea Grande, MT.

Em 2002, tornou-se bacharel em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Mato Grosso, em Cuiabá, MT.

Em setembro de 2002, ingressou no programa de pós-graduação, em nível de mestrado, em Ciência Florestal, na área de concentração em Tecnologia da Madeira, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

## ÍNDICE

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. O carvão vegetal como fonte energética.....	3
2.2. Fornos de carbonização utilizados no Brasil.....	5
2.2.1. Caieira ou Meda.....	5
2.2.2. Forno rabo-quente.....	6
2.2.3. Forno de encosta.....	6
2.2.4. Forno de superfície.....	7
2.2.5. Forno de superfície com câmara externa.....	7
2.2.6. Forno Retangular.....	8
2.2.7. Fornos metálicos por batelada.....	9
2.2.8. Fornos metálicos contínuos (retortas).....	10
2.3. Comparação dos tipos de fornos de carbonização mais utilizados na produção de carvão vegetal no Brasil.....	11
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	13
3.1. Instrumentação do Forno.....	15
3.2. Lenha.....	17
3.3. Registro das temperaturas.....	18
3.4. Carbonização.....	19
3.5. Perfil térmico médio.....	19
3.6. Carvão vegetal.....	19
3.7. Rendimentos gravimétrico e volumétrico.....	20
3.8. Determinação do poder calorífico superior.....	20
3.9. Avaliações Estatísticas.....	20
3.10. Rotina Operacional.....	21
3.10.1. Carregamento do forno.....	21
3.10.2. Ignição nas câmaras de combustão externa.....	22
3.10.3. Processo de carbonização.....	23
3.10.4. Processo de resfriamento.....	23
3.10.5. Descarregamento do forno.....	24



3.11. Determinação do Balanço de Massa e Energia do Sistema.....	24
3.11.1. Determinação do peso da água .....	25
3.11.1.1. Água livre: .....	25
3.11.1.2. Água adesão: .....	25
3.11.2. Determinação da energia consumida com água .....	26
3.11.2.1. Energia consumida com água livre: .....	26
3.11.2.2. Energia consumida água adesão: .....	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
4.1. Produção de carvão vegetal.....	27
4.1.1. Resultados médios.....	27
4.1.2. Análise de variância .....	31
4.2. Perfil térmico médio.....	34
4.3. Balanço de massa e energia .....	37
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	39
6. SUGESTÕES .....	41
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	42

## RESUMO

ARRUDA, Tatiana Paula Marques de, M. S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2005. **Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares.** Orientador: Alexandre Santos Pimenta. Conselheiros: Benedito Rocha Vital e Ricardo Marius Della Lucia.

O presente estudo objetivou avaliar o desempenho de fornos retangulares no processo de carbonização, envolvendo duas rotinas de carbonização. As rotinas analisaram a influência de tatus e câmaras de combustão externa no processo de carbonização, analisando-se: a) umidade da lenha, tempo de ignição, tempo de carbonização, temperatura máxima média, taxa de aquecimento, temperatura final, tempo de resfriamento, rendimento volumétrico, rendimento gravimétrico, umidade do carvão, matérias voláteis, cinza, carbono fixo, poder calorífico e tiços; b) a eficiência do sistema de monitoramento térmico na aquisição de temperaturas; c) o perfil térmico do forno nas fases de carbonização e de resfriamento; d) o balanço de massa e de energia, no processo da carbonização nos fornos retangulares. As carbonizações foram realizadas em quatro fornos de alvenaria retangulares, com câmara de combustão externa, chaminé e capacidade volumétrica para 160 estéreos, instrumentados com termopares do tipo PT 100, para registrar as temperaturas. A lenha utilizada foi o clone A08, híbrido do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, com idade de sete anos, com 3 m de comprimento, densidade básica de 530 kg/m<sup>3</sup> e diâmetro médio de 17,5 cm. Foram realizadas oito carbonizações para cada rotina. Os resultados foram

interpretados a partir das análises de estatística descritiva, para obtenção dos resultados médios e da análise de variância. Para os parâmetros umidade da lenha, tempo de ignição, temperatura máxima média, taxa de aquecimento, rendimento gravimétrico e umidade do carvão, foram observadas diferenças, estatisticamente, significativas, indicando resultados diferenciados entre as rotinas estudadas. Em relação aos parâmetros tempo de carbonização, temperatura final, tempo de resfriamento, rendimento volumétrico, matérias voláteis, carbono fixo e tiço, não houve diferenças estatísticas significativas, indicando que para esses parâmetros não houve diferenças entre as rotinas. O poder calorífico superior médio do carvão vegetal para a rotina 1 foi de 6.582,84 kcal/kg e para a rotina 2 foi de 6.854,33 kcal/kg. No perfil térmico da carbonização, observou-se maior tempo de carbonização, em função do elevado teor de umidade da lenha (66% e 48%) para as rotinas 1 e 2, respectivamente. No balanço de massa e de energia, mais de 50% da energia total do sistema é perdida, havendo grande perda na conversão madeira-carvão e na queima de gases da carbonização. Conclui-se, portanto, que a rotina 2, caracterizada pelo uso das câmaras de combustão externa, é mais eficiente no controle da carbonização.

## ABSTRACT

ARRUDA, Tatiana Paula Marques de, M. S., Universidade Federal de Viçosa, February, 2005. **Evaluation of two carbonization routines in rectangular kilns.** Adviser: Alexandre Santos Pimenta. Committee Members: Benedito Rocha Vital and Ricardo Marius Della Lucia.

The objective of this work was to evaluate the performance of rectangular kilns in the carbonization process, involving two carbonization routines. The routines analyzed the influence of carbonization air inlets and external combustion chambers in the carbonization process, by the following parameters: a) firewood moisture, ignition time, carbonization time, mean maximum temperature, heating rate, final temperature, cooling time, volumetric yield, gravimetric yield, charcoal moisture, volatile matters, ashes, fixed carbon, calorific power and unburned wood residuals; b) the efficiency of the thermal monitoring system to reach the temperatures; c) the thermal profile of the kiln in the carbonization and cooling phases; and d) the mass and energy balance in the carbonization process in rectangular kilns. The carbonizations were carried out in four rectangular brick kilns, with external combustion chamber, chimney and volumetric capacity for 160 steres, equipped with thermocouples type PT 100, to register the temperatures. The firewood used was the A08 clone which is an hybrid of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla*, seven year old, 3 m long, basic density of 530 kg/m<sup>3</sup> and mean diameter of 17,5 cm. Eight carbonizations for each routine were made. The results were interpreted by the descriptive statistics analysis, for the obtention of the mean results and variance

analysis. For the parameters firewood moisture, ignition time, mean maximum temperature, heating rate, gravimetric yield and charcoal moisture, significant statistical differences were observed, indicating differentiated results between the routines studied. For the parameters carbonization time, final temperature, cooling time, volumetric yield, volatile matters, fixed carbon and unburned wood residuals, there were no significant statistical differences indicating that for these parameters there were differences between the routines. The higher mean calorific power of the charcoal for the routine 1 was of 6.582,84 kcal/kg and for the routine 2 it was of 6.854,33 kcal/kg. In the carbonization thermal profile a greater carbonization time was observed, due to the high moisture content of the firewood (66 and 48%) for the routines 1 and 2, respectively. In the mass and energy balance more than 50% of the total energy of the system was wasted showing that there is great waste in the wood-coal conversion and in the burning of carbonization gases. Therefore, it was concluded that routine 2 which is characterized by the use of external combustion chambers is more efficient in the carbonization control.

## 1. INTRODUÇÃO

O carvão mineral, ao entrar no cenário de produção de metais substituiu o uso da madeira como fonte térmica e redutora, na forma de carvão vegetal. A utilização do carvão mineral, iniciada em 1770, com a Revolução Industrial, e do petróleo, iniciada no fim do século XIX, marcou a substituição da energia renovável pela energia baseada em combustíveis fósseis. Concentrada em determinadas regiões da terra, essa energia induziu um modelo de desenvolvimento concentrador de população, tecnologia, renda e poder. Com a crise energética mundial, na década de 1970, sobre a possível escassez de petróleo, um combustível fóssil cujas reservas estavam concentradas em poucos países, fez com que uma realidade incontestável viesse à tona: o fim da energia concentrada e a oportunidade de uso da energia solar (CASCARELLI, 2001).

Segundo SAMPAIO (2001), a produção de ferro e outros metais, a partir de biomassa plantada, recicla na floresta o CO<sub>2</sub> emitido no ciclo industrial e regenera o oxigênio, através do processo fotossintético. Durante o ciclo de produção da biomassa, são formados estoques de CO<sub>2</sub> fixado e O<sub>2</sub> liberado para a atmosfera.

O carvão vegetal é um insumo amplamente utilizado pelas siderurgias brasileiras como agente redutor, principalmente, por se tratar de uma matéria-prima renovável e pouco poluente, quando comparada aos combustíveis fósseis, sendo empregado na produção de ferro-gusa, aço e ferro-ligas.

No Brasil, a produção de carvão vegetal é feita em fornos de alvenaria pouco desenvolvidos, onde o controle da carbonização depende fundamentalmente do conhecimento do operador, estes se baseiam em fatores

subjetivos, como coloração da fumaça, nas paredes e porta do forno (forno retangular) e temperatura das paredes, sentida pelo tato das mãos.

Os fornos de alvenaria para carbonização de madeira sofreram grandes modificações nos últimos quinze anos. Do forno rabo quente, passando pelos fornos de superfície até os retangulares, essas modificações objetivaram maior eficiência e produtividade, em função da crescente demanda no consumo de carvão vegetal, como fonte energética. Os fornos retangulares surgiram a partir da década de 1990, sendo aumentadas suas capacidades volumétricas, saindo de quarenta para quase duzentos estéreos de lenha. O maior dimensionamento proposto ao forno retangular permitiu a mecanização nas etapas de carregamento e descarregamento, minimizando tempo e mão-de-obra e a instrumentação do forno permitiu o acompanhamento térmico do processo de carbonização.

Considerando a importância da produção de carvão vegetal na economia brasileira, algumas empresas estão substituindo os fornos de superfície por fornos de alvenaria retangular; torna-se justificável, portanto, o estudo das técnicas adotadas pelas empresas, como o uso de tatus e das câmaras de combustão externa em fornos instrumentados.

O presente estudo objetivou avaliar o desempenho de fornos retangulares no processo de carbonização envolvendo duas rotinas de carbonização. As rotinas analisaram a influência de tatus e câmaras de combustão externa no processo de carbonização, analisando-se: a) os parâmetros do processo: umidade da lenha, tempo de ignição, tempo de carbonização, temperatura máxima média, taxa de aquecimento, temperatura final, tempo de resfriamento, rendimento volumétrico, rendimento gravimétrico, umidade do carvão, matérias voláteis, cinzas, carbono fixo, poder calorífico e tiço; b) a eficiência do sistema de monitoramento térmico na aquisição de temperaturas; c) o perfil térmico do forno nas fases de carbonização e de resfriamento; d) o balanço de massa e de energia, no processo da carbonização nos fornos retangulares.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. O carvão vegetal como fonte energética**

O carvão vegetal é produzido a partir da lenha através do processo de carbonização, que consiste no tratamento térmico da madeira, numa atmosfera controlada de oxigênio. O uso de carvão vegetal, como redutor do minério de ferro no Brasil, data de 1591, em fundições artesanais para produzir ferramentas de uso agrícola, na Colônia. Ao contrário do que aconteceu nos países industrializados, no Brasil, o uso industrial do carvão vegetal continua sendo largamente praticado. O Brasil é o maior produtor mundial desse insumo energético. No setor industrial, o ferro-gusa, aço e ferro-ligas são os principais consumidores do carvão vegetal, envolvendo quase 85% do consumo (ROCHA et al., 2001).

Na Tabela 1, é apresentado o consumo de carvão vegetal no Brasil, originado de florestas nativas e plantadas.



**Tabela 1** – Histórico do consumo de carvão vegetal no Brasil (1.000 mdc\*).

<b>Ano</b>	<b>Carvão vegetal (Florestas Nativas)</b>	<b>Carvão vegetal (Florestas Plantadas)</b>	<b>Total</b>
1993	17.923	13.777	31.700
1994	15.180	17.820	33.000
1995	14.920	16.164	31.084
1996	7.800	18.200	26.000
1997	5.800	17.800	23.600
1998	8.600	17.800	26.400
1999	8.070	18.830	26.900
2000	7.200	18.200	25.400
2001	8.367	17.853	26.220
2002	7.571	19.249	26.820
2003	7.616	21.586	29.202

Fonte: SILVIMINAS (2003)

\*mdc (metro de carvão)

No Estado de Minas Gerais, está localizada a mais importante região de produção de ferro-gusa do mundo e um dos mais significativos modelos de auto-sustentabilidade, onde é crescente a aplicação de tecnologia limpa na siderurgia a carvão vegetal, a partir de biomassa cultivada. É o principal Estado produtor de carvão vegetal oriundo da silvicultura, com uma produção que somou, em 2003, 1.602.744 toneladas, ou o equivalente a 75% do total nacional correspondendo a 2.149.650 toneladas (IBGE, 2003).

Em 2003, os setores que mais consumiram carvão vegetal no Brasil foram os setores industriais, na produção de ferro-gusa (20.220.000 mdc), aço (3.383 mdc), ferro-ligas (3.164.000 mdc), e outros, que consiste em carvão doméstico, churrascaria, forjas artesanais (2.133.000 mdc) (SILVIMINAS, 2003).

Conforme a Tabela 2, Minas Gerais é o maior consumidor de carvão vegetal do país.

**Tabela 2** – Consumo de carvão vegetal por Estado (1.000 mdc).

<b>Estado</b>	<b>Ano de 2002</b>	<b>Ano 2003</b>
Minas Gerais	17.214	19.470
São Paulo	890	890
Rio de Janeiro	333	402
Espírito Santo	1.092	1.300
Bahia	613	630
Mato Grosso do Sul	328	340
Maranhão/Pará	5.650	5.470
Outros	700	700
<b>Total</b>	<b>26.820</b>	<b>29.202</b>

Fonte: SILVIMINAS (2003)

## **2.2. Fornos de carbonização utilizados no Brasil**

### **2.2.1. Caieira ou Meda**

O forno de terra é o mais antigo método de produção de carvão e, provavelmente, o mais difundido no mundo. Nesse forno, a lenha a ser carbonizada é empilhada ou colocada em valas escavadas no chão; posteriormente, ela é totalmente recoberta com terra, deixando-se algumas aberturas para a entrada de ar. Não requer investimento e é construído no próprio local da retirada da madeira. No Brasil, o forno de terra é o forno caieira ou meda, que se encontra atualmente em desuso. O tempo de carbonização é oito a doze dias; o rendimento é de 20%, e a produtividade, 30m<sup>3</sup>/homem/mês (Baêta, 1946, citado por PINHEIRO et al., 2001).

Os fornos caieira são de uso intensivo de mão-de-obra e requerem atenção e reparos, principalmente nas primeiras vinte quatro horas, devido ao perigo da queda da camada de terra, que permite a entrada de ar, resultando na combustão da madeira e na perda total da madeira. Os fornos de terra e poço são, geralmente, usados em áreas pobres e sem recursos, sendo ainda utilizados no Maranhão e Pará.

### **2.2.2. Forno rabo-quente**

O forno rabo-quente, também chamado de “biscoiteiro”, em algumas regiões, é o modelo de forno de alvenaria mais barato, mais simples e possivelmente, o mais difundido dos fornos de carbonização (CETEC, 1982). Esse tipo de forno apresenta dificuldade no controle da carbonização (tatus e baianas), exige vigilância contínua na carbonização; a qualidade do carvão é muito variável, mecanização dificultada, podendo obter rendimento gravimétrico que varia entre 25-35%.

Segundo FERREIRA (2000), o carregamento do forno rabo-quente é feito manualmente, sendo a lenha cortada em toretes de 1,0 a 2,0 m de comprimento, de acordo com as dimensões do forno. A lenha é pré-seca ao ar até atingir, aproximadamente, 30% de umidade.

O controle de ar é feito pelo fechamento progressivo dos orifícios. Normalmente, o forno rabo-quente não possui chaminé e a entrada do ar necessário para a combustão é feita por orifícios distribuídos ao longo da circunferência ao nível do piso (tatus) e a saída de gases pelos orifícios distribuídos em toda a sua superfície (ventaneiras ou baianas) O avanço do processo de carbonização é acompanhado pela coloração da fumaça que escapa pelos orifícios. O ciclo completo varia de cinco a sete dias, podendo fazer de quatro a seis carbonizações por mês.

### **2.2.3. Forno de encosta**

Os fornos de encosta também são um modelo de forno bastante difundido, principalmente em Minas Gerais, em função do baixo custo, facilidade de operação e possibilidade de aproveitamento do desnível natural de terrenos acidentados (CETEC, 1982). Os procedimentos de produção são semelhantes aos adotados para o forno rabo-quente, podendo obter rendimento gravimétrico que varia entre 25 a 30%.

#### **2.2.4. Forno de superfície**

Segundo CAMPOS e VALENTE (1993), em escala industrial, os fornos de superfície são os mais difundidos, em especial os de geometria circular e teto, em forma de abóbada. Nesses fornos, a lenha é disposta na vertical, por meio de carregamento manual; a tiragem dos gases é feita por chaminé, geralmente situada na sua lateral; as entradas de ar (tatus) se encontram na parte inferior da parede, ao longo de toda sua circunferência. Esse tipo de forno apresenta rendimentos gravimétricos entre 32 e 35%.

O forno de cinco metros de diâmetro, também conhecido como forno padrão, produz, em média, 20 mdc por corrida (fornada), a partir de uma carga de 36 estéreos de lenha, levando aproximadamente de dez a doze dias para uma operação completa (carga, carbonização, resfriamento e descarga), podendo realizar de 2,5 a 3 corridas por mês (VALENTE, 1986).

#### **2.2.5. Forno de superfície com câmara externa**

Os fornos de superfície com câmara externa são fornos de alvenaria cilíndricos, com copa em forma de abóbada, uma chaminé lateral de tiragem central e uma câmara de combustão externa. Os fornos de superfície apresentam as mesmas características dos fornos de superfície tradicional, mas o calor para a transformação da lenha em carvão é fornecido pela queima de lenha ou qualquer outro tipo de material como cascas, galhos etc, na câmara externa de combustão. Nesse sistema de carbonização não há queima de lenha no interior do forno, podendo ter um melhor aproveitamento do seu espaço interno, com maior rendimento, pois toda a lenha enforada pode ser transformada em carvão. O controle da carbonização é feito, exclusivamente, através da câmara (CETEC, 1982).

### **2.2.6. Forno Retangular**

Os fornos retangulares com câmara de combustão externa possuem estrutura de concreto e são construídos em alvenaria com tijolo comum, revestido com massa produzida a partir da mistura de areia, argila e água. Segundo ZUCHI (2001), o comprimento padrão do forno retangular com câmaras externas é de 13,10 m, largura de 3,95 m e altura da parede de 3,5 m; a produção varia entre 65 a 72 m<sup>3</sup> de carvão.

A porta desses fornos possui duas seções e um sistema de articulação nas dobradiças que permite a sua elevação e rebaixamento sobre depressão existente no piso; no momento em que a porta é rebaixada, as duas seções se encaixam perfeitamente na depressão, promovendo a vedação.

Nesses fornos, os tatus foram substituídos por duas câmaras de combustão externa, em forma de caixas, construídas em alvenaria e localizadas na parte externa do forno. As câmaras interligam-se com a parte interna do forno, através de canais, onde os gases aquecidos circulam, promovendo a carbonização.

Na parte do fundo da abóbada do forno, fica posicionada a clarabóia, com dimensão 0,7 x 0,5 m, cuja função é facilitar a entrada de ar, no início da carbonização. No sentido oposto às câmaras de combustão externa, sai o canal de fumaça interligado à chaminé, que possui altura de 5,90 m.

O resfriamento do forno é natural, com aplicação de barrela, que consiste numa mistura de areia, argila e água, com a função de suprimir as fissuras e trincas, impedindo a entrada de ar no forno.

O forno retangular, quando comparado aos fornos rabo-quente, de encosta, de superfície, apresenta um custo mais elevado de implantação; por permitir mecanização no carregamento e descarregamento, reduz custos com mão-de-obra, bom isolante térmico, recuperação de alcatrão e possibilidade de instrumentação, podendo obter rendimento gravimétrico que varia entre 35 a 38%.

O carregamento do forno é feito com a grua. A lenha é colocada na posição horizontal, no sentido maior do forno, facilitando seu manuseio e empilhamento. O descarregamento do carvão é feito com pá carregadeira.

A operação de carbonização possui o mesmo princípio do forno de superfície com câmara externa. O calor necessário para carbonizar a lenha é gerado nas câmaras de combustão externa e, depois, lançado no interior do forno por meio de canais, com saída na base interna do forno, permitindo a transferência de calor com a lenha enforada. Nesse tipo de sistema, o controle do processo é mais fácil, porque a entrada de ar na carbonização é controlada pelas câmaras de combustão externa.

Atualmente, os fornos retangulares possuem sistema de monitoramento térmico, através da leitura da temperatura em vários pontos, utilizando um aparelho de infravermelho, associado ao software Matlab (CAMPOS, 2000). Utilizam-se termopares do tipo PT100, inseridos nas paredes e teto do forno, interligado ao programa Web Server (Ferro Gusa Carajás). A instrumentação do forno permite o acompanhamento da temperatura no processo de carbonização e de resfriamento.

### **2.2.7. Fornos metálicos por batelada**

Os fornos metálicos de batelada são pequenos fornos de carbonização que podem ser facilmente transportados para uma área próxima à extração da madeira, acompanhando o desmatamento, diminuindo o custo de transporte da lenha. A escolha entre um forno fixo e móvel depende da localização do suprimento da biomassa, e dos custos relativos da mão-de-obra. Sua grande desvantagem é a perda de calor pelas paredes, que diminuem o rendimento do forno. Estes fornos têm 2,70 m de diâmetro e altura 1,7 m, com paredes e cúpulas formadas por painéis metálicos de 0,86 x 1,70m, ajustáveis por parafusos. Possuem oito respiradores na cúpula e orifícios de 2,5cm de diâmetro a cada 10 cm da base. Os fornos são assentados diretamente sobre o solo. O tempo do ciclo de carbonização é de dois dias e o rendimento gravimétrico varia entre 24-30% (PINHEIRO et al., 2001).

O forno container UFV consiste de um recipiente cilíndrico de aço e um poço de alvenaria. O container cheio de madeira é posicionado dentro do poço de alvenaria, onde é realizada a carbonização. Em uma câmara de combustão externa, são queimados resíduos vegetais que produzem o calor necessário para secar a madeira e iniciar a combustão. Após oito a dez horas, o container

é retirado para fora do poço de alvenaria para esfriar. O resfriamento é rápido (10 a 15 horas), devido às perdas de calor pelas paredes metálicas do container. A correta circulação e exaustão dos gases é garantida por um ventilador que suga a fumaça do leito de carbonização e a conduz para um sistema de condensação, onde se recupera o alcatrão e o pirolenhoso. Os fornos container podem obter rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, na faixa de 35 a 38%. (PIMENTA e BARCELLOS, 2000).

### **2.2.8. Fornos metálicos contínuos (retortas)**

As retortas são normalmente construídas em material metálico, possibilitam a recuperação dos voláteis e produzem grandes quantidades de carvão vegetal, de forma contínua, de melhor qualidade e homogeneidade, devido às condições controladas do processo.

Numa retorta vertical, o calor é introduzido pelo topo, através de gases quentes. A velocidade de carbonização é controlada pela vazão e temperatura dos gases de circulação. A carbonização se inicia no topo da retorta e avança em direção ao fundo, no mesmo sentido do fluxo de gás. Os produtos da destilação são separados dos gases não condensáveis ao passarem em resfriadores, separadores de alcatrão e lavadores de gases. Parte dos gases não condensáveis é retirada do sistema para ser usada nos aquecedores de gás ou na secagem da madeira. O gás aquecido, a aproximadamente 480°C, sai dos aquecedores, retornando à retorta para fechar o ciclo dos gases. Ao final do período de carbonização cerca de 18 horas o carvão é descarregado em silos para resfriamento (ALMEIDA e REZENDE, 1982).

Em geral, as retortas apresentam um rendimento gravimétrico de 30%, e permitem recuperar cerca de 600kg/ton de carvão, produtos químicos como alcatrão, ácido acético, metanol etc, além de 6300 MJ de gases de baixo poder calorífico. O carvão produzido tem cerca de 75 a 85% de carbono fixo. O ciclo de destilação varia de dezoito horas a alguns dias (PINHEIRO et al., 2001).

### **2.3. Comparação dos tipos de fornos de carbonização mais utilizados na produção de carvão vegetal no Brasil**

Segundo PINHEIRO et al. (2001), os pequenos fornos de alvenaria (rabo-quente, superfície) são simples, de fácil construção e manejo, além do baixo investimento. Podem ser construídos e operados próximos à exploração florestal, diminuindo os custos de transporte. O baixo investimento permite instalar os fornos acompanhando a exploração florestal e compensa a pequena produtividade dos fornos. Podem ser desmontados e os tijolos podem ser utilizados na construção de um novo forno. Produzem um carvão de rendimento e de qualidade comparável aos produzidos pelas grandes retortas. A carga de lenha e a descarga do carvão são feitas manualmente, o que implica num uso intensivo de mão-de-obra não especializada. Se não houver a recuperação do alcatrão, existe uma grande emissão de poluentes.

Os grandes fornos de alvenaria, principalmente os retangulares, permitem instrumentação e mecanização da carga e descarga, reduzindo custos com mão-de-obra e permitindo menores ciclos de produção, devido à minimização de tempo na carga e descarga do forno. A instalação de um sistema de recuperação de alcatrão e licor pirolenhoso permite maior rendimento energético e reduz o impacto ambiental. O uso de uma câmara externa de combustão diminui o consumo da madeira, aumentando a taxa de conversão.

Na Tabela 3, são apresentados os custos de implantação, produção, eficiência, tempo e vida útil dos fornos mais utilizados na produção de carvão vegetal no Brasil.



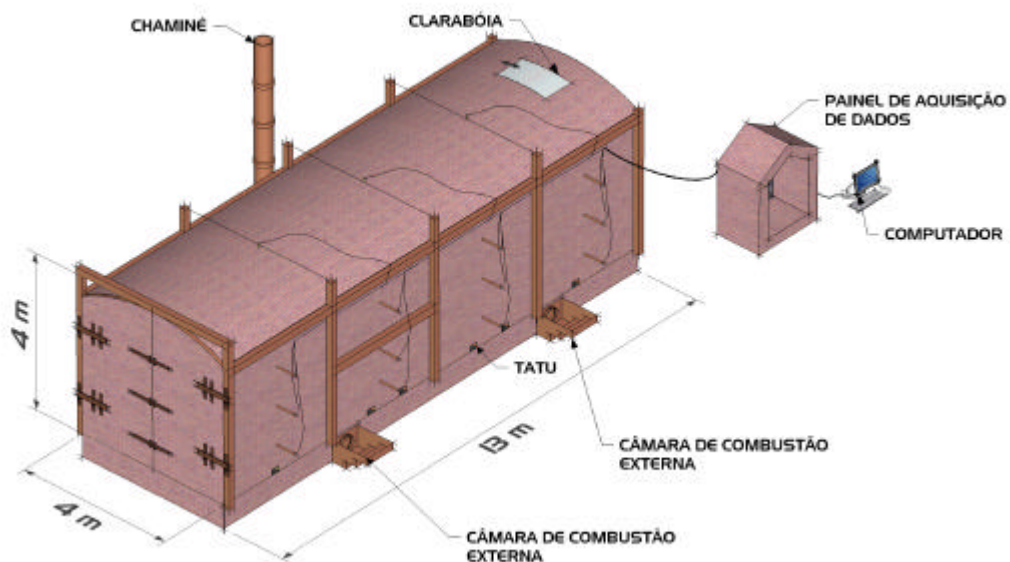
**Tabela 3** – Comparação dos custos de implantação, produção, eficiência, tempo e vida útil dos fornos mais utilizados na produção de carvão de vegetal no Brasil.

<b>Fornos</b>	<b>Custo (US\$)</b>	<b>Produção (m<sup>3</sup>/mês)</b>	<b>Eficiência (%)</b>	<b>Tempo (dias)</b>	<b>Vida útil (anos)</b>
Rabo-quente (3 m)	100	16-20	22-27	5-7	2
Encosta (3 m)	130	24	35-38	7-8	3
Superfície (5 m)	700	50	22-27	8-9	3-5
Retangular (190 st)	15.000	220	33-38	10-12	10

Fonte: PINHEIRO et al. (2001)

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados para desenvolver este trabalho foram obtidos de fornos retangulares de 160 estéreos, construídos em alvenaria, com dimensões de 13 m x 4 m x 4 m, contendo câmaras de combustão externa, chaminé e clarabóia, conforme mostra a Figura 1.

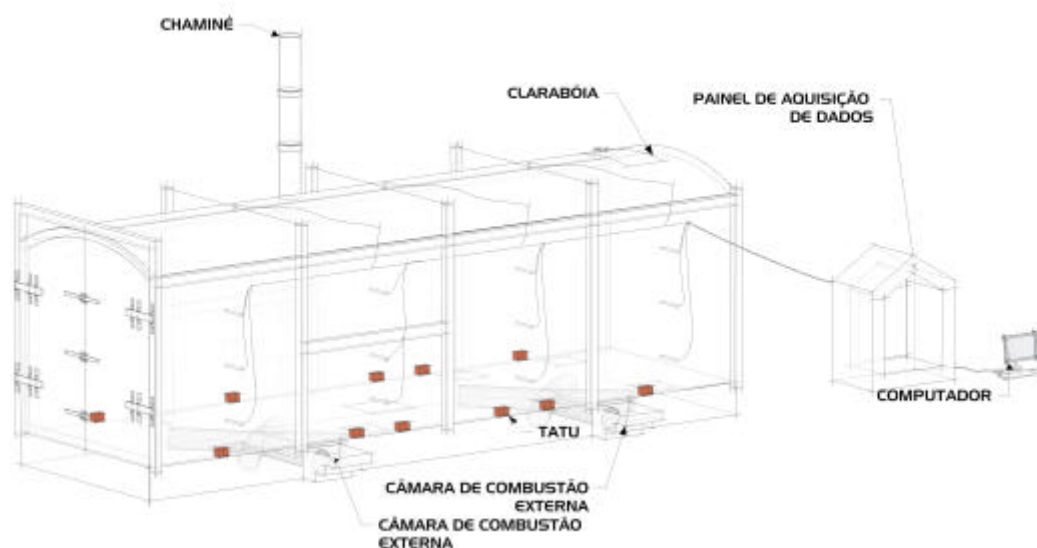


**Figura 1** – Representação esquemática do forno retangular usado na Empresa Ferro Gusa Carajás.

Esses fornos estão instalados na Fazenda Monte Líbano, de propriedade da empresa Ferro Gusa Carajás, na cidade de Açailândia/MA. O experimento foi conduzido em quatro fornos retangulares em rotina operacional industrial, durante o período de seis meses.

O estudo foi adaptado à rotina operacional da empresa, sendo avaliado o desempenho do forno retangular, em duas rotinas de carbonização, estabelecidas pela empresa. A primeira rotina foi determinada em função do elevado teor de umidade da lenha (69%), com 90 dias de secagem ao ar livre. Em função disso, nessa rotina foi providenciada a abertura de tatus com o objetivo de acelerar a carbonização.

Foram conduzidas oito carbonizações, com controle da entrada de ar no sistema de carbonização, por meio das câmaras de combustão externa e abertura de onze tatus nas bases das paredes do forno, sendo seis tatus, na parede sem chaminé, e cinco tatus, na parede com chaminé, de acordo com a Figura 2.



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

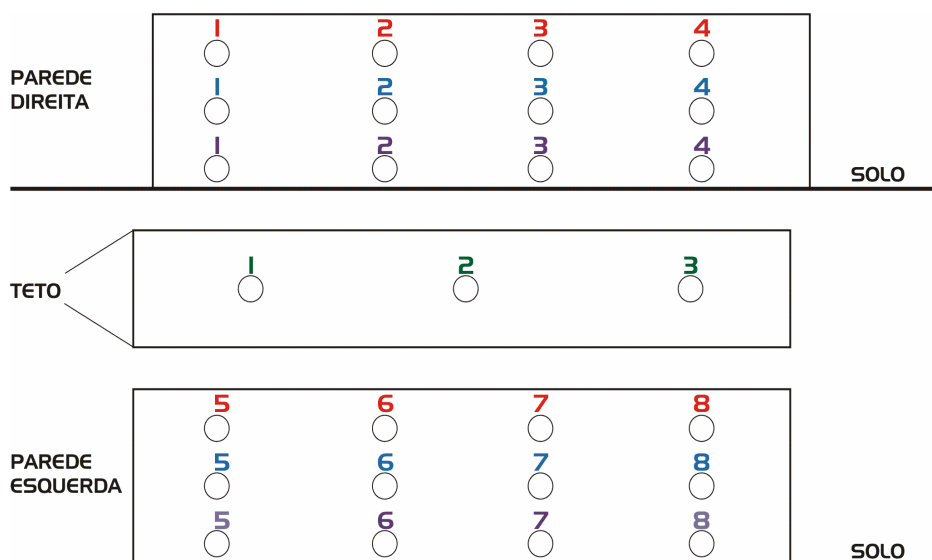
A abertura de tatus objetivou acelerar o processo de carbonização, conduzida por um período aproximado de 72 horas, tempo necessário para a

geração de brasas nos orifícios, indicando o momento de fechamento dos mesmos. Após o fechamento dos tatus, o controle da entrada de ar no forno foi mantido apenas pelas câmaras de combustão externa.

Foram conduzidas oito carbonizações com controle da entrada de ar no sistema de carbonização, somente por meio das câmaras de combustão externa; a umidade da lenha, neste período, era de 48%. Esse período incluiu as fases de carregamento, carbonização, resfriamento e descarregamento.

### 3.1. Instrumentação do Forno

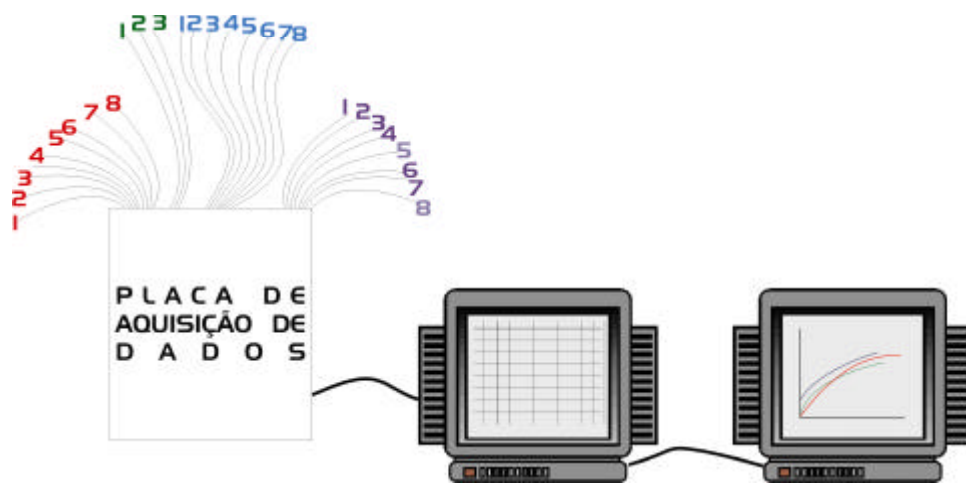
O forno foi instrumentado com o objetivo de obter o perfil térmico do processo de carbonização, em escala industrial. Foram inseridos 12 termopares em cada parede lateral, em três alturas (superior, médio e inferior) e três termopares no teto, totalizando vinte sete pontos de medição, conforme mostra a Figura 3.



**Figura 3** – Esquemática do posicionamento dos sensores no forno.

As temperaturas medidas representaram as temperaturas das faces laterais internas do forno, via termopares do tipo PT-100, inseridos através da parede de tijolos de 20 cm de espessura, perfurando a parede com um furo de

8 mm de diâmetro e 20 cm de profundidade, ficando rente à parede. Cada termopar foi colocado dentro de um pequeno tubo de aço inox com 6 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, que serviu de proteção aos termopares. Estes termopares foram conectados a cabos de 3 condutores de 150 mm de comprimento, e conectados a cabos de cobre de AF 4X226AWG, instalados num painel de distribuição que recebeu o sinal de temperatura e o converteu em sinal elétrico padronizado, enviando ao computador, conforme mostra a Figura 4.



**Figura 4** – Distribuição e armazenamento dos dados de temperaturas.

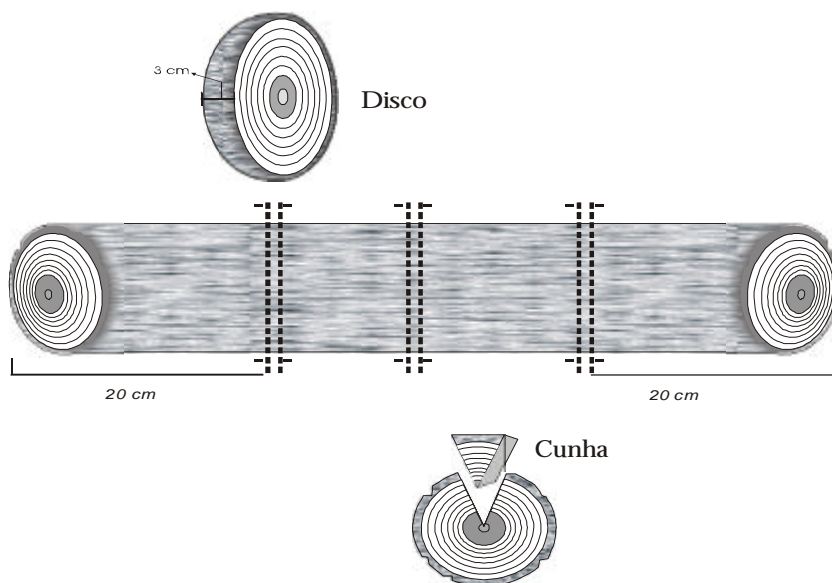
No computador, utilizou-se o programa “Web Server WS 10”, que consiste num dispositivo que tem como funções básicas a aquisição, concentração e entrega de dados de termopares e equipamentos de medição, criou uma interface dos dados adquiridos no processo, em páginas HTML dinâmicas, o que permite visualizar as temperaturas em tempo real, utilizando um navegador de internet. Este produto foi desenvolvido pela “Novus - Produtos Eletrônicos”, Porto Alegre/RS.

### 3.2. Lenha

A lenha utilizada na carbonização foi o clone A08, híbrido do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, com idade de sete anos. O comprimento da lenha foi de 3 m e o diâmetro médio foi de 17,5 cm.

A lenha foi pesada num caminhão antes do descarregamento na Unidade de Produção de Redutor (UPR), com auxílio de balança rodoviária. Na UPR, o caminhão foi descarregado nos boxes de cada forno. Box é uma estrutura construída para estocagem de lenha para ser enfornada, por isso, seu posicionamento na UPR deve ter, como referência, a porta do forno. Os boxes apresentaram as dimensões de três metros de largura x quatro metros de altura x dezenove metros de comprimento, o que possibilitou quantificar o volume de lenha enfornada em cada carbonização. O critério de medição adotado foi medir a altura da pilha de lenha no box a cada dois metros de distância, em ambos os lados da pilha para compor a média aritmética da altura. O resultado da multiplicação das medidas (altura x comprimento da pilha x comprimento da lenha (largura)) foi considerado o volume em estéreos de lenha. O fator de conversão em metros cúbicos utilizado pela empresa foi de 1,46 st/m<sup>3</sup>; em todas as carbonizações foram determinados os volumes de lenha enfornada.

Para a determinação da umidade e da densidade foram retiradas aleatoriamente quinze peças como amostra de cada carbonização. De cada peça foram retirados três discos de, aproximadamente, 3 cm de espessura, sendo dois deles a 20 cm das extremidades e 1 no centro, conforme mostra a Figura 5.



**Figura 5** – Coleta de discos da lenha para determinação da umidade e densidade.

De cada disco foram retiradas cunhas, para os cálculos da umidade e densidade. Para a determinação da umidade, as cunhas foram pesadas e, a seguir, levadas à estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ , durante 24 horas.

Para a determinação da densidade básica, foi utilizado o método da balança hidrostática (VITAL, 1984); as amostras foram saturadas com água, determinando-se o volume de água deslocada das amostras, em balança de precisão de 0,01 g. As amostras foram secas em estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ , por 24 horas e pesadas.

### **3.3. Registro das temperaturas**

Os dados das temperaturas foram arquivados da página HTML, fornecida pelo programa WS 10, em intervalos de uma hora, após o início do processo de carbonização e lançados no programa “Excel XP”.

### **3.4. Carbonização**

Em todas as carbonizações, foram registradas data e hora do início do processo, com o objetivo de determinar os tempos de carbonização e de resfriamento.

O tempo gasto na ignição foi determinado pela temperatura média, dos 27 pontos de monitoramento, quando a mesma fosse maior ou igual a 45°C.

Através do registro das temperaturas foi identificada a temperatura média máxima atingida na carbonização e a taxa de aquecimento.

### **3.5. Perfil térmico médio**

Para traçar o perfil térmico nos processos de carbonização e de resfriamento foi utilizada a média geral dos vinte sete pontos de leitura de temperatura, medidos no forno.

### **3.6. Carvão vegetal**

Para se avaliar a qualidade do carvão, foram coletadas amostras de diferentes alturas e posição na pilha de carvão, com um total de doze amostras por carbonização. O procedimento de amostragem e preparação da amostra foi executado conforme a norma ABNT NBR 6923/81.

Os procedimentos utilizados para a análise química imediata foram os das normas ASTM D-1762-64 e na ABNT NBR 8112/83. Na aplicação da última, foram adotadas, como normas complementares, a NBR 5734/83 e NBR 6923/81.

O carvão foi pesado em caminhão do tipo gaiola com volume conhecido e determinada a densidade a granel.



### 3.7. Rendimentos gravimétrico e volumétrico

O rendimento gravimétrico foi determinado através da relação massa de carvão seco produzido por massa de lenha seca, por meio da equação 1.

$$RG = (Mc/MI) \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

RG = Rendimento gravimétrico (%) (B.S.);

Mc = Massa de carvão seco (kg);

MI = Massa de lenha seca (kg).

O rendimento volumétrico foi determinado pela relação volume de lenha carbonizada por volume de carvão produzido, por meio da equação 2.

$$RV = (VI/Vc) \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

RV = Rendimento volumétrico (m<sup>3</sup>);

VI = Volume de lenha (m<sup>3</sup>);

Vc = Volume de carvão (m<sup>3</sup>).

### 3.8. Determinação do poder calorífico superior

O poder calorífico superior do carvão foi calculado com base na média de oito carbonizações realizadas para a rotina 1 e oito carbonizações realizadas para a rotina 2, sendo determinados numa bomba calorimétrica adiabática, sistema PARR. Os passos utilizados para o cálculo do poder calorífico superior foram realizados conforme a norma ASTM D-2015-66.

### 3.9. Avaliações Estatísticas

Foram realizadas duas rotinas de carbonização com oito repetições cada rotina. Os dados obtidos foram submetidos à estatística descritiva para obtenção dos resultados médios e análise de variância.

### 3.10. Rotina Operacional

#### 3.10.1. Carregamento do forno

A lenha foi enforçada com a grua e posicionada horizontalmente no interior do forno, ou seja, com as extremidades da lenha em direção à porta, conforme mostra a Figura 6.



**Figura 6** – Enforçamento da lenha.

O carregamento do forno foi feito em camadas de lenha, ou seja, finalizando o empilhamento da lenha em uma camada, passou-se para a próxima, até preencher o forno com um total de quatro pilhas. Cada pilha interna foi acomodada sobre três travesseiros, dispondo-se as toras no sentido transversal à pilha, um ao nível do solo e os outros dois ao longo da pilha, conforme mostra a Figura 7.



**Figura 7** – Forno com carga completa.

O objetivo do uso dos travesseiros é promover maior circulação dos gases no interior do forno. A altura média das pilhas foi de 3,5 metros, determinada pela medição da altura da pilha em três pontos (nas extremidades e no meio), depois de finalizada a formação de cada pilha. Essa atividade foi desenvolvida com o objetivo de se determinar qual o espaço limite que a grua poderia atingir na formação das pilhas no forno. O tempo médio para enchimento do forno foi de três horas. As pilhas foram colocadas bem próximas entre si, de modo que ocupem o espaço limite de treze metros de comprimento do forno, proporcionando o livre fechamento da porta. A porta do forno foi fechada e com barro feita a vedação das frestas entre as folhas da porta e as paredes do forno.

### **3.10.2. Ignição nas câmaras de combustão externa**

Após o fechamento do forno, procedeu-se à ignição. Para isso, foram separadas algumas peças de lenha, tiços e cascas para a ignição e alimentação das câmaras de combustão externa. No início da carbonização é importante a atenção à abertura da clarabóia, cuja função é estabelecer a

circulação acelerada dos gases de combustão iniciada nas câmaras de combustão, externa.

A ignição do forno foi feita nas duas câmaras de combustão, simultaneamente. A clarabóia foi fechada após, aproximadamente, 90 minutos ao início da ignição.

### **3.10.3. Processo de carbonização**

Durante toda a carbonização foi feita a vedação de trincas e fissuras para impedir o vazamento dos gases e a entrada de oxigênio. O carbonizador acompanhou a marcha de carbonização e efetuou a coleta de alcatrão e ácido pirolenhoso na caixa de retenção da chaminé e armazenou-os em tambores de duzentos litros.

A habilidade dos carbonizadores foi de fundamental importância, pois eles conduziram os processos de carbonização, determinando o momento certo de fechamento dos tatus e de redução e vedação das câmaras de combustão; tal procedimento é embasado em conhecimentos práticos adquiridos ao longo do tempo, tais como diminuição no volume de fumaça, alteração na cor da fumaça de esbranquiçada para azulada clara, coloração das paredes e da porta, bem como a temperatura das paredes, sentida pelo tato das mãos.

O encerramento da carbonização ocorreu pela interrupção de oxigênio dentro do forno, por meio das vedações da chaminé e das câmaras de combustão externa. Após o fechamento total das câmaras de combustão, foram vedadas as fissuras e trincas no forno, dando início ao processo de resfriamento.

### **3.10.4. Processo de resfriamento**

O forno foi resfriado naturalmente, através da troca de calor das paredes com o ambiente externo. Foi utilizada na “barrela”, uma mistura de argila, areia e água aplicada por um equipamento, denominado “barrelador”. O barrelamento tem a função de suprimir as fissuras e trincas, impedindo a

entrada de ar no forno e garantir o perfeito resfriamento do forno. Foram realizadas, em média, doze barrelas por forno.

### **3.10.5. Descarregamento do forno**

Os fornos foram abertos quando as temperaturas registradas nos pontos de medição variavam entre 60 a 80°C. No momento da abertura da porta, os operadores estavam atentos a possíveis focos de fogo que pudessem surgir no carvão. Por isso, um dos operadores tinha sempre em mãos um mangote de água ligado a um hidrante na lateral do forno, para aplicação do jato de água somente sobre o foco de incêndio.

O descarregamento do carvão foi feito com a pá carregadeira para uma área do pátio, previamente demarcada. O tempo médio de descarregamento do forno foi de uma hora e meia.

A formação das pilhas de carvão no pátio foi observada por um operador, uma vez que a temperatura da massa do carvão recém-desenfundado é elevada e, em contato com ar, poderia entrar em combustão. Por isso, as pilhas de carvão ficaram sob observação durante quarenta e oito horas. Após esse período, o carvão foi pesado e armazenado. O carvão foi armazenado em uma área da UPR preparada para o armazenamento e, depois, coberto com uma lona.

### **3.11. Determinação do Balanço de Massa e Energia do Sistema**

O balanço de massa e energia foi calculado, considerando as médias das carbonizações efetuadas para as duas rotinas, com o objetivo de obter, uma estimativa de consumo de energia nos fornos retangulares avaliados.

No poder calorífico da madeira foi utilizada a média de 4.700 kcal/kg para uma umidade acima de 30% (B.S); e o poder calorífico do carvão foi de 6.582,84 kcal/kg para a rotina 1 e 6.854,33 kcal/kg para a rotina 2, obtidos em bomba calorimétrica adiabática. A memória de cálculo utilizada para a determinação do balanço de massa e de energia no sistema de carbonização foi:

Energia = 30% (600 kcal/kg – água livre)

Energia < 30% (824 kcal/kg – água adesão)

### 3.11.1. Determinação do peso da água

$$P_a = (P_{lú} - (P_{lú}/(1+U))) \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

$P_a$  = Peso água (kg);

$P_{lú}$  = Peso lenha úmida (kg);

$U$  = Umidade da lenha (%).

#### 3.11.1.1. Água livre:

$$P_{al} = (P_a * (U - 30) / U) \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

$P_{al}$  = Peso água livre (kg);

$P_a$  = Peso da água (kg);

$U$  = Umidade da lenha (%);

#### 3.11.1.2. Água adesão:

$$P_{aa} = P_a - P_{al} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

$P_{aa}$  = Peso água adesão (kg);

$P_a$  = Peso água (kg);

$P_{al}$  = Peso água livre (kg).

### 3.11.2. Determinação da energia consumida com água

#### 3.11.2.1. Energia consumida com água livre:

$$E_{al} = P_{al} * E_{=30\%} \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

$E_{al}$  = Energia água livre (kcal/kg);

$P_{al}$  = Peso água livre (kg);

$E_{=30\%}$  = Energia consumida água livre (600 kcal/kg).

#### 3.11.2.2. Energia consumida água adesão:

$$E_{aal} = P_{aa} * E_{<30\%} \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

$E_{aa}$  = Energia água adesão (kcal/kg);

$P_{aa}$  = Peso água adesão (kg);

$E_{<30\%}$  = Energia consumida água adesão (824 kcal/kg).

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Produção de carvão vegetal**

#### **4.1.1. Resultados médios**

As médias dos resultados obtidos nas rotinas de carbonização são mostradas no Quadro 1.

Os teores de umidade da lenha, utilizada nas rotinas 1 e 2, foram de 66% e 48% respectivamente; o elevado teor de umidade da lenha, resultou no aumento do tempo de carbonização.

A densidade básica da lenha foi de 530 kg/m<sup>3</sup>; de acordo com a mensuração florestal feita pela empresa, o diâmetro médio foi de 17,5 cm.

O volume médio de lenha enfiada para as rotinas 1 e 2 foram 95 m<sup>3</sup> e 106 m<sup>3</sup>, respectivamente. A diferença no volume de lenha enfiada entre as rotinas se deve ao fato do rearranjo da lenha no interior do forno, caracterizado, exclusivamente, pela habilidade do operador.

O peso úmido da lenha para as rotinas 1 e 2 foram de 91.173 e 73.547 kg, respectivamente. Observa-se uma grande diferença de peso entre as rotinas para uma diferença no volume de lenha enfiada de 11 m<sup>3</sup>. Considerando-se que a umidade da lenha utilizada para a rotina 1 foi de 66% e para a rotina 2 foi de 48%, a diferença entre o peso da lenha para as rotinas é bem significativa. Para esse fato, é possível que estas diferenças de peso tenham ocorrido em função da não aferição contínua da balança, no momento da pesagem.



**Quadro 1** – Resultados médios obtidos para as rotinas de carbonização.

Variáveis	Rotina 1	Rotina 2
<b>Lenha</b>		
Umidade (%B.S)	66	48
Densidade básica (kg/m <sup>3</sup> ) (B.S)	530	530
Diâmetro (cm)	17,5	17,5
Comprimento (m)	3,00	3,00
<b>Carbonização</b>		
Volume médio de lenha enfiada (m <sup>3</sup> )	95	106
Peso úmido de lenha enfiada (kg)	91.713	73.547
Peso seco de lenha enfiada (kg)	54.930	49.565
Peso de lenha carbonizada (kg)	50.170	47.712
Volume de lenha carbonizada (m <sup>3</sup> )	85	101
Tempo médio de ignição (hs)	12	8
Tempo médio de carbonização (dias)	10	9
Temperatura máxima média (°C)	238	302
Taxa média de aquecimento (°C/h)	0,7	0,95
Temperatura média final (°C)	219	249
Tempo médio de resfriamento (dias)	5	5
<b>Rendimentos</b>		
Volumétrico (m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> c)	1,75	1,76
Gravimétrico (%B.S)	23,8	28,4
<b>Carvão</b>		
Volume de carvão (m <sup>3</sup> )	49	58
Peso úmido do carvão (kg)	12.460	14.537
Peso seco do carvão (kg)	11.893	13.439
Umidade (%) (B.S)	4,73	8,15
Materiais voláteis (%)	22,94	22,52
Cinza (%)	0,34	0,8
Carbono fixo (%)	76,72	76,68
Poder calorífico superior (kcal/kg)	6.582,84	6.854,33
<b>Outras</b>		
Densidade a granel (kg/m <sup>3</sup> ) (B.S)	241	232
Volume médio de Tiço (m <sup>3</sup> )	10,26	4,08
Peso médio de Tiço (kg)	4.760	1.853

O tempo de ignição para as rotinas 1 e 2 foram de, aproximadamente, doze e oito horas, respectivamente. Pode-se considerar que o tempo de ignição foi influenciado pela umidade da lenha.

O tempo de carbonização foi de, aproximadamente, dez dias para a rotina 1 e nove dias para a rotina 2. Quanto maior a umidade da lenha, maior será o tempo necessário para carbonizá-la, no entanto, observa-se que o tempo de carbonização, entre uma rotina e outra, variou apenas em um dia; com isto, pode-se considerar que o uso de tatus acelerou o processo de

carbonização, visto que a umidade da lenha para a rotina 1 era de 66%, contra 48% na rotina 2.

A temperatura máxima média atingida no processo de carbonização nas rotinas 1 e 2 foram de 238 a 302°C, respectivamente. Segundo a literatura, a temperatura afeta de maneira diferenciada cada elemento químico da madeira, de modo que a composição química do carvão e os rendimentos são influenciados pela temperatura de carbonização. Observa-se que, na rotina 2, a temperatura máxima média foi mais elevada, mas não apresentou diferenças na composição química do carvão entre as rotinas.

A taxa de aquecimento média para as rotinas 1 e 2 foram de 0,7 e 0,95°C/h, respectivamente. A taxa de aquecimento é a velocidade em que a temperatura se eleva num dado intervalo de tempo, enquanto a lenha é carbonizada. A velocidade de aquecimento no processo de carbonização tem grande influência nos rendimentos gravimétricos e no teor de carbono fixo do carvão vegetal. Segundo OLIVEIRA (1988), as taxas mais elevadas de aquecimento tendem a produzir um carvão mais friável, devido à expansão dos gases da madeira ser mais intensa, durante a carbonização. Em contrapartida, taxas mais lentas promovem aumento da densidade verdadeira do carvão, porque retém os voláteis no carvão. De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que a taxa de aquecimento na rotina 2 foi mais elevada, mas não apresentou diferenças nos resultados da composição química do carvão vegetal.

A temperatura média final de carbonização para as rotinas 1 e 2 foram de 219 e 249 °C, respectivamente. A temperatura final de carbonização determina o teor de carbono fixo, que tende a aumentar com o aumento da temperatura, acompanhado pela redução concomitante do teor de matérias voláteis. Na rotina 2, a temperatura final da carbonização mostrou-se mais elevada, embora os teores de carbono fixo e matérias voláteis apresentassem resultados muito próximos.

O tempo de resfriamento médio para as rotinas 1 e 2 foi de cinco dias.

Os rendimentos volumétricos médios obtidos nas rotinas 1 e 2 foram 1,75 e 1,76 m<sup>3</sup>, respectivamente. Os valores obtidos não apresentam grandes diferenças na conversão de madeira em carvão vegetal.

Os rendimentos gravimétricos obtidos nas rotinas 1 e 2 foram 23,8 e 28,4%, respectivamente. Segundo VALENTE (1986), o elevado teor de umidade da lenha, além de estender o tempo de carbonização, reduz o rendimento gravimétrico, ao consumir parte da carga da lenha para evaporar a água, o que reduz o rendimento em base seca.

O volume de carvão vegetal obtido nas rotinas 1 e 2 foi de 49 e 58 m<sup>3</sup>, respectivamente, indicando que, houve maior perda de carvão na rotina 1; para este fato, pode-se considerar que a abertura de tatus provocou a redução no volume de massa lenhosa, em função, da queima de parte da lenha enfiada para desencadear o processo de combustão.

A umidade do carvão para a rotina 2 mostrou-se elevada, 8,15%, sendo que na rotina 1 foi de 4,71%; para esse fenômeno, acredita-se que não houve influência do processo; o que possivelmente ocorreu foi incêndio na carga de carvão; para apagar o fogo foi utilizada água.

O teor médio de carbono fixo nas duas rotinas 1 e 2 foram de 76,72 e 76,68%; respectivamente.

Os teores de cinzas obtidos foram de 0,34 e 0,8% para as rotinas 1 e 2, respectivamente. Observa-se que na rotina 2, a porcentagem de cinzas foi maior; a esta variação é possível que no momento da descarga do carvão, houvesse incorporação de materiais estranhos como pedra, terra e outros elementos.

O poder calorífico superior médio do carvão obtido para as rotinas 1 e 2 foram de 6.582,84 e 6.854,33 kcal/kg, respectivamente. Observa-se que o poder calorífico do carvão na rotina 2 foi maior do que na rotina 1; considerando-se que foi utilizada a mesma matéria-prima, pode-se concluir que essa diferença se deve à temperatura de carbonização. Em estudo realizado por COUTINHO (1984), foi comprovada a dependência direta do aumento do poder calorífico superior do carvão vegetal, de acordo, com o aumento da temperatura de carbonização.

A densidade a granel obtida para as rotinas 1 e 2 foi de 241 e 232 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. MENDES et al. (1982) comentam que a densidade a granel, normalmente, varia entre 200 a 300 kg/m<sup>3</sup>.

Os volumes médios de tiço gerados nas rotinas 1 e 2 foram de 10,26 m<sup>3</sup> e 4,08 m<sup>3</sup>, respectivamente, indicando que a temperatura de carbonização e o

tempo de exposição da lenha à temperatura não foram suficientes para carbonizar a lenha. Observa-se que, o volume de tiço gerado na rotina 1 foi elevado, caracterizando uma carbonização irregular. Dessa forma, pode-se considerar que, durante a carbonização, enquanto alguns pontos estavam em temperaturas muito elevadas (nas proximidades dos tatus), outros não atingiram temperaturas que possibilitassem uma carbonização mais completa da lenha, o que gerou grande volume de tiço; o fluxo dos gases quentes por todo o leito é difícil, porque depende da circulação natural. Tudo isso contribuiu para um baixo rendimento gravimétrico.

#### **4.1.2. Análise de variância**

Os resultados da análise de variância dos parâmetros avaliados no processo de carbonização, umidade da lenha, tempo de ignição, tempo de carbonização, temperatura máxima média, taxa de aquecimento, temperatura final, tempo de resfriamento, rendimento volumétrico, rendimento gravimétrico, umidade do carvão, matérias voláteis, cinzas, carbono fixo e volume de tiço, estão apresentados no Quadro 2.

Foram observadas diferenças estatísticas significativas nos parâmetros: umidade da lenha, tempo de ignição, temperatura máxima média, taxa de aquecimento, rendimento gravimétrico, umidade do carvão e cinzas, indicando resultados diferenciados entre as rotinas estudadas.

Em relação à umidade da lenha, observa-se claramente a diferença apresentada entre as duas rotinas. Para esse fato, é possível considerar que, na rotina 2, o teor de umidade da lenha carbonizada é mais aceitável em relação à rotina 1, porque apresentou um menor teor de umidade; entretanto, os teores de umidade da lenha utilizada para este estudo estão muito acima das recomendações (30% B.S).

**Quadro 2** – Resultados da análise de variância dos parâmetros avaliados; umidade da lenha (U%), tempo de ignição (TI), tempo de carbonização (TC), temperatura máxima média (TPMM), taxa de aquecimento (TX), temperatura final (TF), tempo de resfriamento (TR), rendimento volumétrico (RV), rendimento gravimétrico (RG), umidade do carvão (UC); matérias voláteis (MV), cinzas (CZ), carbono fixo (CF) e tiço.

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>U</b>	<b>TI</b>	<b>TC</b>	<b>TPMM</b>	<b>TX</b>	<b>TF</b>	<b>TR</b>	<b>RV</b>	<b>RG</b>	<b>UC</b>	<b>MV</b>	<b>CZ</b>	<b>CF</b>	<b>TIÇO</b>
<b>Tratamento</b>	1	1.260,25	60,06	4	16.512,25	0,25	3.540,25	0,25	0,35	83,11	46,65	0,7	0,84	0,62	152,89
		**	**	n.s	**	*	n.s	n.s	n.s	**	*	n.s	**	n.s	n.s
<b>Resíduo</b>	14	47,2	8,45	4,78	1.663,48	0,55	1.847,68	1,34	0,57	8,56	10,76	25,01	0,6	24,67	40,91
<b>Média</b>	-	57,25	9,81	9,25	269,75	0,82	234,12	5,25	1,75	26,07	6,44	22,73	0,57	76,7	7,17
<b>CV<sub>exp</sub>(%)</b>	-	12,05	29,63	23,65	15,12	28,61	18,36	22,04	13,59	11,21	50,95	22	42,81	6,48	89,24

\* e \*\* = significativos a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

n.s. = não-significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

A rotina 2 apresentou um tempo de ignição mais rápido, o que normalmente se espera no processo de carbonização; provavelmente, isto ocorreu, em função, do menor teor de umidade da lenha, bem como, a ausência de tatus. A ausência deste permitiu a formação de uma massa de ar quente mais homogênea no interior do forno. Já, na rotina 1, a abertura de tatus permitiu a entrada constante de ar no interior do forno, o que provocava uma mistura contínua do ar quente com o ar atmosférico, dificultando o equilíbrio de temperatura internamente no forno.

De acordo com a temperatura máxima média atingida no processo de carbonização, pode-se considerar que, na rotina 2, a temperatura foi mais satisfatória, por se apresentar mais elevada; no entanto, a faixa ideal de temperatura está no intervalo de 300 a 500°C (WENZL, 1970).

Conforme os valores obtidos para a taxa de aquecimento, pode-se considerar que a rotina 2 foi mais satisfatória, porque atingiu uma taxa mais elevada a uma temperatura média final de carbonização de 249°C.

Quanto ao rendimento gravimétrico na base seca, a rotina 2 obteve um resultado mais aceitável, indicando que a técnica utilizada foi mais eficiente, uma vez que, o teor de umidade da lenha era inferior à rotina 1.

Em relação à umidade do carvão, a rotina 1 mostrou-se mais satisfatória, porque obteve menor umidade. O carvão vegetal utilizado como agente redutor de minério requer uma baixa porcentagem de água. Quanto maior a umidade do carvão, maior é a quantidade de carvão a ser utilizada, reduzindo o espaço no alto-forno.

De acordo com os teores de cinzas obtidos, considera-se que, a rotina 1 foi mais aceitável. Altos teores de cinzas podem prejudicar a produção de ferro-gusa, ferro-ligas e metais não ferrosos, podendo provocar, no caso do ferro-gusa, o fenômeno da segregação.

Não houve diferenças estatísticas significativas para os parâmetros: tempo de carbonização, temperatura final, tempo de resfriamento, rendimento volumétrico, matérias voláteis, carbono fixo e volume de tiço, indicando que para esses parâmetros não houve diferenças entre as rotinas.

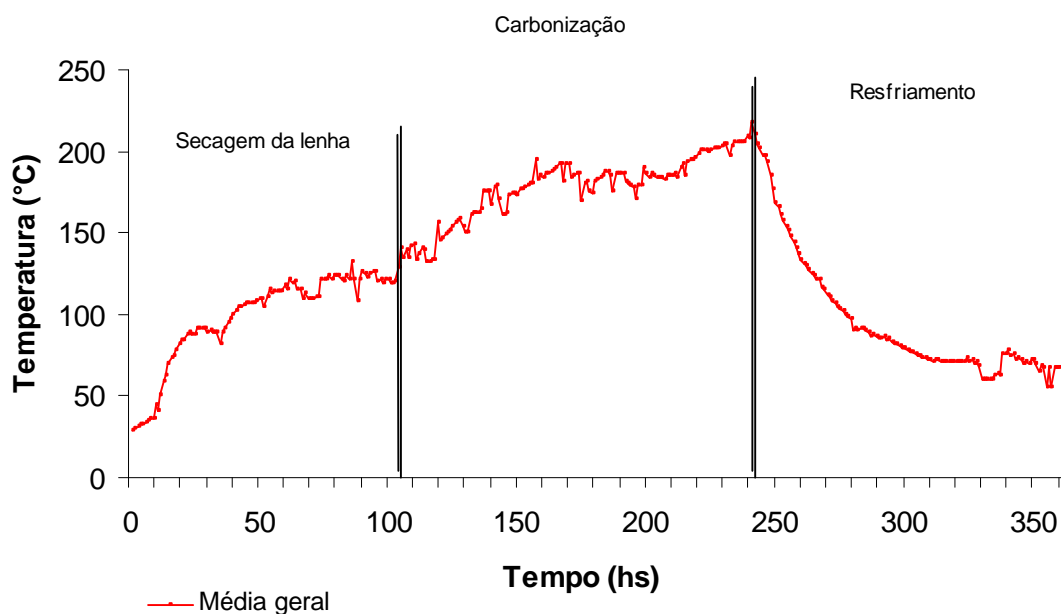
Observam-se grandes diferenças nos coeficientes de variação para os parâmetros estudados. Segundo PIMENTEL GOMES (2000), o coeficiente de variação é uma estatística útil e há muito tempo utilizado em ensaios

experimentais; dá uma idéia da precisão do experimento. Não há estudos ou referências que caracterizem o percentual aceitável do coeficiente de variação para esse tipo de estudo; nesse caso, deve-se tomar, como referência, os resultados comumente obtidos em ensaios agrícolas de campo. O coeficiente de variação é considerado baixo quando inferiores a 10%, médios quando variam de 10-20%; altos, quando variam de 20-30% e muito altos, quando superiores a 30%.

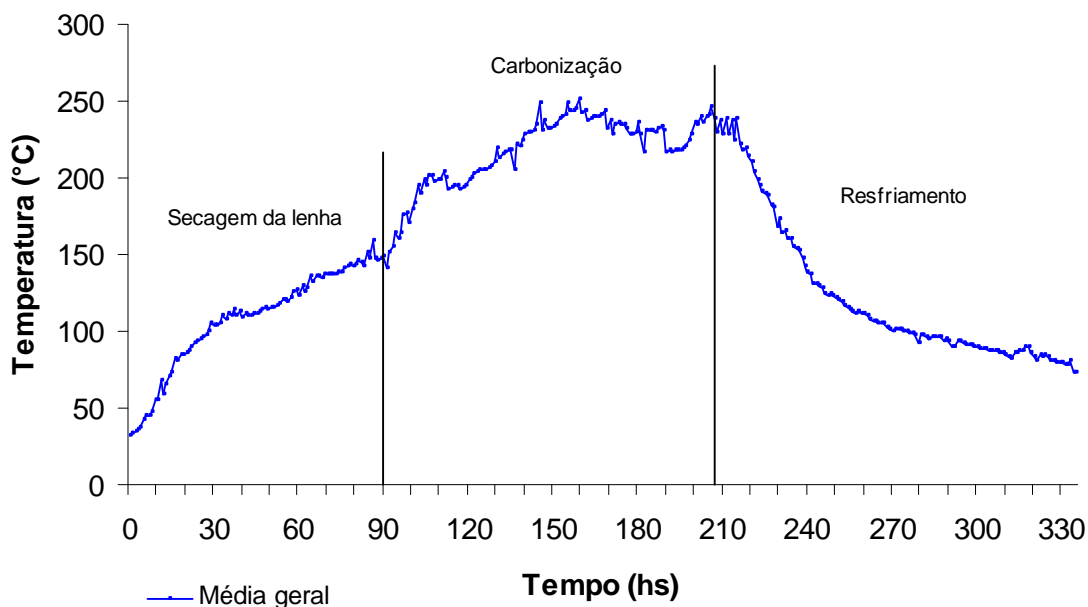
Pode-se observar que o coeficiente de variação para os parâmetros: umidade do carvão, teor de cinza e tiço, foi considerado muito alto.

#### 4.2. Perfil térmico médio

Com os registros das temperaturas coletadas em intervalos de uma hora, foi possível obter o perfil térmico médio do processo de carbonização, nas rotinas 1 e 2, conforme mostram as Figuras 8 e 9 respectivamente.



**Figura 8** – Perfil térmico médio do processo de carbonização na rotina 1.



**Figura 9** – Perfil térmico médio do processo de carbonização na rotina 2.

Nas Figuras 8 e 9, estão apresentados os perfis térmicos médios das carbonizações e dos resfriamentos para as rotinas 1 e 2, respectivamente. A Figura 8 representa a rotina 1, com um tempo médio de carbonização de 240 horas e um tempo médio de 120 horas para secagem da lenha, cuja umidade era de 66% (B.S). A fase de secagem da lenha não é claramente evidenciada, mas, de acordo com ALMEIDA (1982), a fase de secagem da lenha se encontra nos intervalos de temperaturas entre 110 a 200°C.

A Figura 9 representa o perfil térmico da rotina 2, com um tempo médio de carbonização de 210 horas e tempo médio de secagem da lenha de 95 horas, para uma umidade de 48% (B.S). Observa-se que o tempo de carbonização e de secagem da lenha foi inferior à rotina 1. Estatisticamente, não houve diferença significativa no tempo de carbonização entre as duas rotinas.

Pode-se considerar que o tempo necessário para concluir o processo de carbonização foi determinado pelo elevado teor de umidade da lenha usado na carbonização. Com base nesses resultados, deve-se levar em consideração as recomendações de VALENTE (1986): carbonizar madeira com teor de umidade entre 20 a 30% (base seca), porque a madeira, com elevada quantidade de água, resulta num carvão friável e quebradiço, elevando o teor de finos no manuseio e transporte. O teor de umidade da lenha muito elevado aumenta o



tempo de carbonização; conseqüentemente, reduz a produção e compromete a qualidade do carvão.

A instrumentação do forno permitiu a observação da evolução do perfil térmico no processo de carbonização, notando-se o comportamento semelhante nas duas rotinas, embora se deva ressaltar que o monitoramento do perfil térmico do forno baseou-se somente na temperatura das paredes e tetos. Pode-se observar, nos gráficos, que as temperaturas médias não ultrapassaram 250°C. Em teste isolado, foi medida a temperatura interna da lenha durante o processo de carbonização, em posições diferenciadas na pilha de lenha, registrando temperaturas superiores a 500°C; observou-se que as maiores oscilações de temperaturas foram registradas na parte superior do forno; no entanto, a inserção de termopares nas paredes e teto do forno não caracterizou a temperatura real de carbonização, mas permitiu um melhor acompanhamento da marcha de carbonização, o que antigamente se baseava somente na cor da fumaça e na temperatura sentida pelo tato das mãos.

No processo de resfriamento, o tempo médio para as rotinas foi de cinco dias. O tempo de resfriamento obtido por CAMPOS (2000) para um forno retangular, com capacidade volumétrica de 190 estéreos, foi de nove dias. Considerando a similaridade do forno estudado pelo autor e os estudados neste trabalho, pode-se concluir que os resultados obtidos foram satisfatórios.

HAHNE et al. (1991), estudando meios porosos, mencionam que a troca de calor é dada por condução, radiação e convecção; por isso, a velocidade de resfriamento se deve a uma série de fatores que vai desde a construção do forno até a temperatura atingida, entre outros fatores. Nota-se que o perfil térmico obtido nas duas rotinas foi similar aos modelos encontrados por CAMPOS 2000; observando-se a diminuição gradativa das temperaturas ao longo do processo.

Devido à quase inexistência de literatura a respeito da transferência de calor em leitos de carvão, torna-se difícil comparar os resultados.

### 4.3. Balanço de massa e energia

O balanço energético apresentou o equilíbrio de conversão da massa em energia para as duas rotinas de carbonização nos fornos retangulares de 160 estéreos. A partir dos resultados pode se avaliar a eficiência do sistema, suas perdas e possibilidades de uso. Os dados estão apresentados nos Quadros 3 e 4.

**Quadro 3** – Balanço de massa e energia despendida e resultante no processo de carbonização em fornos retangulares de 160 estéreos, para a rotina 1, utilizando o peso médio de lenha base úmida (kg) e umidade média da lenha (66% B.S).

Tipo	Massa (kg)		PCS (kcal/kg)	Energia Consumida (x10 <sup>6</sup> kcal/kg)			Energia (%)	
	Entrada	Saída		Água Livre (>30%)	Água adesão (<30%)	Total	Entrada	Saída
Lenha	91.173		4.700				100	
Água		36.243		12 x10 <sup>6</sup>	14x10 <sup>6</sup>	26x10 <sup>6</sup>		11
Carvão		11.893	6.582,84					33
Perdas		43.037						56
<b>Total</b>	91.173	91.173	-	-	-	-	100	100

**Quadro 4** – Balanço de massa e energia despendida e resultante no processo de carbonização em fornos retangulares de 160 estéreos, para a rotina 2, utilizando o peso médio de lenha base úmida (kg) e umidade média da lenha (48%).

Tipo	Massa (kg)		PCS (kcal/kg)	Energia Consumida (x10 <sup>6</sup> kcal/kg)			Energia (%)	
	Entrada	Saída		Água Livre (>30%)	Água adesão (<30%)	Total	Entrada	Saída
Lenha	73.547		4.700				100	
Água		23.982		5 x10 <sup>6</sup>	12x10 <sup>6</sup>	17x10 <sup>6</sup>		8
Carvão		13.436	6.854,33					41
Perdas		36.129						51
<b>Total</b>	73.547	73.547	-	-	-	-	100	100

De acordo, com os resultados dos Quadros 3 e 4, foi necessário um total de 19% de energia para a secagem da lenha. Essa energia despendida para a evaporação da água na lenha correspondeu a 26 mdc. Se considerarmos o preço atual do metro do carvão vegetal em R\$ 110, 00 pode-se considerar uma perda de R\$ 2.853,43 em carvão vegetal, somente para secagem de lenha.

A energia prevista no final do processo, na forma de carvão vegetal, foi inferior a 50%, para ambas as rotinas. Essa energia produzida nas rotinas 1 e 2 33 e 41% respectivamente, se convertida em quantidade de carvão vegetal, corresponderia a, aproximadamente, 102 mdc, o equivalente a R\$ 11.220,00.

No entanto, as perdas de energia no sistema, através das paredes, fumaça, aquecimento da lenha, queima de carvão, resfriamento do carvão etc foram superiores a 50%, com 56% para a rotina 1 e 51% para a rotina 2. Se consideramos a energia total consumida pelo sistema, convertendo-as em carvão vegetal, apresentariam um montante de 145 mdc o equivalente a R\$ 15.950,00.

Se analisar o sistema, verificar-se-á que as perdas de 145 mdc são significativamente maiores que os ganhos de 102 mdc.

Essa quantidade de energia perdida no sistema poderia ser aproveitada na secagem da lenha, o que reduziria, parcialmente, o consumo de energia para a evaporação de água, bem como, a recuperação dos poluentes emitidos na fumaça para a atmosfera.

Reduzindo-se os gastos de energia, no âmbito geral do processo de produção de carvão vegetal, nos fornos retangulares estudados, poder-se-ia, talvez, obter um rendimento maior que 35%.

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

O presente estudo objetivou avaliar o desempenho da carbonização em fornos retangulares, envolvendo duas rotinas de carbonização. As rotinas analisaram a influência de tatus e câmaras de combustão externa no processo de carbonização, analisando-se: a) os parâmetros do processo: umidade da lenha, tempo de ignição, tempo de carbonização, temperatura máxima média, taxa de aquecimento, temperatura final, tempo de resfriamento, rendimento volumétrico, rendimento gravimétrico, umidade do carvão, matérias voláteis, cinzas, carbono fixo, poder calorífico e tiço; b) a eficiência do sistema de monitoramento térmico na aquisição de temperaturas; c) o perfil térmico do forno nas fases de carbonização e de resfriamento; d) o balanço de massa e de energia, no processo da carbonização nos fornos retangulares.

Para isto, foram utilizados quatro fornos de alvenaria retangular, com câmara de combustão externa, chaminé e capacidade volumétrica para 160 estéreos, instrumentados com termopares do tipo PT 100, para registrar as temperaturas.

A lenha utilizada foi o clone A08, híbrido do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, com idade de sete anos, com 3 m de comprimento, densidade básica  $530 \text{ kg/m}^3$  e diâmetro médio de 17,5 cm. Foram realizadas oito carbonizações para cada rotina.

Foram feitas as pesagens da lenha e do carvão produzido, assim como, a análise química imediata do carvão vegetal, o poder calorífico superior do

carvão, o monitoramento térmico do processo de carbonização e o balanço de massa e de energia dos fornos retangulares.

Os resultados foram interpretados a partir das análises de estatística descritiva, para obtenção dos resultados médios, e da análise de variância.

De maneira geral, considerando as condições em que o experimento foi desenvolvido, obtiveram-se os seguintes resultados:

Para os parâmetros: umidade da lenha, tempo de ignição, temperatura máxima média, taxa de aquecimento, rendimento gravimétrico e umidade do carvão, foram observadas diferenças, estatisticamente, significativas, indicando resultados diferenciados entre as rotinas estudadas.

Em relação aos parâmetros: tempo de carbonização, temperatura final, tempo de resfriamento, rendimento volumétrico, matérias voláteis, carbono fixo e tiço, não houve diferenças estatísticas significativas, indicando que, para esses parâmetros, não houve diferenças entre as rotinas.

O poder calorífico superior médio do carvão vegetal para a rotina 1 foi de 6.582,84 kcal/kg e, para a rotina 2, foi de 6.854,33 kcal/kg.

No perfil térmico da carbonização, observou-se maior tempo de carbonização em função do elevado teor de umidade da lenha.

Quanto ao balanço de massa e de energia, mais de 50% da energia total do sistema é perdida, havendo grande perda na conversão madeira-carvão e na queima de gases da carbonização.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que, entre as técnicas adotadas no presente estudo, a rotina 2, caracterizada pelo uso das câmaras de combustão externa, é mais eficiente no controle da carbonização. Quanto à instrumentação do forno, pode-se concluir que é um sistema tecnicamente viável, mas que, requer ajustes, que permitam a obtenção do perfil térmico da carbonização e do resfriamento mais condizentes com o fenômeno. E em relação à perda de energia gerada no sistema, conclui-se que não é viável, pois as perdas são maiores que os ganhos em produção.

## 6. SUGESTÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, sugerem-se:

- A inserção de um termopar na altura mediana da chaminé, para medir a temperatura dos gases gerados na carbonização.
- Retirar os três termopares inseridos no teto, pois não contribuíram, de forma representativa, para o perfil térmico; talvez a inserção dos mesmos na parede do fundo do forno.
- A interface do programa “Surfer” com o sistema de aquisição de dados das temperaturas. Permite a caracterização do perfil térmico, de maneira, mais rápida e representativa, pois são demonstrados graficamente, através de cores.
- Estudos para o aproveitamento da energia perdida no sistema, na forma de secador e caldeira, que poderão promover a secagem da lenha e o resfriamento do carvão.
- Padronizar o diâmetro da lenha para carbonização.
- Treinamento da equipe.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M.R. **Recuperação de alcatrão em fornos de alvenaria**. Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC. p177-180. 1982.

ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. A. **O processo de carbonização contínua da madeira**. CETEC. Compilado por Waldir Resende Penedo. Belo Horizonte. 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6923/81, NBR 5734/83, NBR 8112/83**. Rio de Janeiro.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-2015-66, ASTM D-167-73, D-1762-64**, Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

CAMPOS, J. C. C.; VALENTE, O. F. **Considerações sobre o inventário de povoamentos florestais com ênfase na biomassa e na sua transformação em carvão vegetal, Viçosa**: SIF, p. 1-17. (Boletim Técnico – Mensuração Florestal, 1). 1993.

CAMPOS, M. B. **Modelagem matemática com validação experimental do resfriamento de leito de carvão vegetal em forno retangular industrial**. Belo Horizonte, UFMG. 116p. (tese M.S).2000.

CASCARELLI, E. G. V. Pequena história de uma grande floresta. In: **MELLO, M. G.** (ed). Biomassa – Energia dos trópicos em Minas Gerais. Belo Horizonte. LABMIDIA. p. 103-113. 2001.

COUTINHO, A. R. **Qualidade do carvão vegetal correlacionada com as características da madeira de *Eucalyptus saligna* e temperatura de carbonização**. Piracicaba, ESALQ. 76p. (Tese M.S.). 1984.

CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Produção e Utilização de Carvão vegetal**. Séries Técnicas CETEC, Belo Horizonte, 393p. 1982.

FERREIRA, O. C. **Emissão de gases de efeito estufa na produção e consumo de carvão vegetal**. In: Economia e Energia. Ano III. Setembro/Outubro. 2000.

HAHNE, E. SONG, Y. W. e GROSS, U. Measurements of thermal conductivity in porous media. In: **Kakac, S., Kilkis, B., Kulacki, F. a. e Aricç, F.** (Ed.). Convective heat and mass transfer in porous media. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. V. 196, p. 849-865. 1991.

IBGE (2003). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da extração vegetal e da silvicultura**. [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acesso 04/03/2005.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. De. **Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal**. In: Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC. SPT – 008, p. 75-90. 1982.

OLIVEIRA, E. de. **Correlação entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex-Maiden)** Viçosa-MG, UFV. 47p. Tese Mestrado. 1988.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C. **Como produzir carvão para churrasco**. Viçosa, CPT. 76p. 2000.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 14<sup>o</sup> Ed. Piracicaba. SP. 477p. 2000.

PINHEIRO, P. C. C.; SAMPAIO, R. S.; BASTOS FILHO, J. G. **Fornos de carbonização utilizados no Brasil**. In: Primeiro congresso Internacional de Uso da Biomassa Plantada Para Produção de Metais e Geração de Eletricidade. Belo Horizonte-MG. Versão em CD-ROM. 2001.

ROCHA, J. D.; SILVA, O. C.; PALETTA, C. E. M.; COELHO, S. T. **Banco de dados de biomassa On Line**. In: Primeiro congresso Internacional de Uso da Biomassa Plantada Para Produção de Metais e Geração de Eletricidade. Belo Horizonte-MG. Versão em CD-ROM. 2001.

SAMPAIO, R. S. Produção de metais com biomassa plantada. In: **MELLO, M. G.** Belo Horizonte. (ed.). Biomassa – Energia dos trópicos em Minas Gerais. LABMÍDIA. p. 163-177. 2001.

SILVIMINAS (2003). Silvicultura de Minas Gerais. Disponível em <http://www.silviminas.com.br> . Acesso em 02/03/2005.

VALENTE, A.F. **Carbonização de Madeira de Eucalipto**. Informe Agropecuário 141: p. 74-79. 1986.



VITAL, B. R. **Métodos de Determinação da Densidade da Madeira.** Viçosa, MG, SIF, 21p. (Boletim técnico, 1). 1984.

ZUCHI, P. S. **A evolução do carvão vegetal e suas repercussões na produtividade e qualidade do carvão, nas condições de trabalho e no meio ambiente: Estudo comparativo.** Belo Horizonte. UFMG. 143p. Tese Mestrado. 2001.

WENZL, H. F. J. **The chemical technology of wood.** New York. Academic Press, 692p. 1970.