

**CLAUDINÉIA OLÍMPIA DE ASSIS**

**SISTEMA ALTERNATIVO PARA CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA**

**LAVRAS  
MINAS GERAIS BRASIL  
MARÇO- 2007**

CLAUDINÉIA OLÍMPIA DE ASSIS

**SISTEMA ALTERNATIVO PARA CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA**

Dissertação Apresentada à Universidade Federal de Lavras como Parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de “Mestre”.

**Orientador:**

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2007

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Assis, Claudinéia Olímpia de  
Sistema alternativo para carbonização de madeira / Claudinéia  
Olímpia de  
Assis. – Lavras : UFLA, 2007.  
49 p. : il.

Orientador: Paulo Fernando Trugilho.  
Dissertação (Mestrado) - UFLA.  
Bibliografia.

1. Carvão vegetal. 2. Madeira. 3. *Eucalyptus*. I. Universidade  
Federal de Lavras. II. Título.

CDD-634.97342  
-662.62

CLAUDINÉIA OLÍMPIA DE ASSIS

**SISTEMA ALTERNATIVO PARA CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA**

Dissertação Apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de “Mestre”.

Aprovada em 06 de março de 2007

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho      UFLA

Prof. Dr. José Reinaldo Moreira da Silva      UFLA

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes      UFLA

Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva      UFPR

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho  
UFLA  
(orientador)

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2007

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida e por estar presente em todos os momentos.

Aos meus pais, Lázaro e Iracilda, pela confiança pela dedicação e incentivo, durante toda minha vida.

A minha tia Gabriela, pela paciência pela dedicação e pelo carinho.

Ao Professor Paulo Fernando Trugilho, pela orientação, pelo carinho, pela dedicação e amizade durante todo o tempo em que trabalhamos juntos.

Aos meus irmãos, por estarem sempre presentes e pela ajuda durante todo estes anos.

Aos meus irmãos Carlos e Lucinéia (*in memoriam*), que sempre me dizia que eu nunca deveria desistir dos meus sonhos.

Aos meus amigos e parentes, obrigada pelo incentivo e por estarem sempre presentes.

A Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciências Florestais, pela realização do curso.

Aos professores José Reinaldo Moreira da Silva e Lourival Marin Mendes, pela co-orientação e apoio durante todo o trabalho.

Ao professor José Tarcisio Lima, pelo apoio e amizade durante todo o curso.

Aos amigos da pós-graduação, Polliana, Fernanda e Ançano, em especial a Adriana e a Marina, pelo apoio e ajuda nos momentos mais difíceis do curso.

A querida Estela, Vanessa e Daniela, obrigada pelas noites que passaram na serraria.

Aos Funcionários do Departamento de Ciências Florestais, José Francisco (fazendeiro), Álvaro (seu Vico), Carlos e Claret, obrigada pela convivência.

## SUMÁRIO

	Páginas
RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 Sistema de Produção.....	4
2.2 Classificação dos fornos de carbonização.....	6
2.2.1 Quanto à fonte de energia.....	6
2.2.2 Quanto à mobilidade.....	7
2.2.3 Quanto à continuidade.....	7
2.2.4 Quanto à evolução.....	7
2.2.5 Fornos de encosta.....	9
2.2.6 Forno rabo quente ou biscoiteiro.....	10
2.2.7 Fornos cilíndricos de superfície.....	12
2.2.8 Forno de superfície com câmara de combustão externa.....	13
2.2.9 Fornos metálicos.....	14
2.3 Processos industriais.....	15
2.3.1 Processo Reichert-Lurgi.....	15
2.3.2 Processo Sific – Lambiotte.....	16
2.3.3 Processo IPT.....	17
2.3.4 Fornos retangulares da Vallourec & Mannesman.....	18
2.3.5 Fornos de carbonização contínua em módulos horizontais.....	19
2.3.6 Fornos de carbonização contínua em módulos verticais.....	19
2.3.7 Forno container.....	20
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1 Construção do protótipo.....	24
3.2 Testes preliminares.....	24
3.3 Características avaliadas no carvão vegetal.....	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1 Características quantitativas do carvão vegetal.....	30
4.2 Características qualitativas do carvão vegetal.....	32
4.2.1 Análise química imediata.....	32
4.2.2 Análise física do carvão vegetal.....	34
4.2.2.1 Classificação granulométrica do carvão vegetal.....	34
4.2.2.2 Densidade relativa aparente e teste de tamboramento.....	35
4.3 Perfil térmico observado do forno.....	36
5 CONCLUSÕES.....	43
RECOMENDAÇÕES.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

## RESUMO

ASSIS, Claudinéia Olímpia. **Sistema alternativo para carbonização de madeira.** 2007. 49 p. Dissertação (Dissertação - Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.<sup>1</sup>

A produção de carvão vegetal é uma atividade que depende da matéria-prima, mão-de-obra e sistema de produção. A matéria-prima necessita possuir algumas características como, por exemplo, alto teor de lignina e densidade básica elevada, para garantir maior produção de carvão vegetal. O sistema de produção deve proporcionar adequada condição de trabalho, procurando estabelecer estratégias para menor tempo do ciclo da carbonização, sem alterar o rendimento e a qualidade do carvão vegetal produzido. Este estudo teve como objetivo testar, avaliar e ajustar um sistema alternativo para a carbonização de madeira, em escala piloto, incluindo a construção e teste de um protótipo. Foram utilizadas madeiras de *Eucalyptus* spp. com 1,15 m de comprimento e diâmetro variando de 6 a 15 cm. Na avaliação geral do sistema foram realizados doze testes, dos quais os dois primeiros serviram para promover ajustes e mudanças no sistema, visando melhorar o seu desempenho. Após estas alterações, foram realizados quatro testes, para a comprovação da eficiência do sistema modificado. Em seguida, foi instalado um medidor de temperatura multicanal de seis pontos, com seis pares termoeletrônicos para a verificação do seu perfil térmico. Foi usada a análise de regressão para estudar a relação existente entre a temperatura média interna do sistema e a temperatura média dos gases eliminados pela chaminé. Foram ajustados três modelos, o linear, o cúbico e o logarítmico. Pelos resultados, observou-se que o tempo médio de esfriamento foi de 10 e 37,5 horas, para a condição de esfriamento fora e dentro da unidade isolante, observam-se, assim, uma redução de 73,33 % no tempo de esfriamento. A produtividade física do sistema apresentou média de 4,35 e 2,0 kg/h, para o esfriamento fora e dentro da unidade isolante, respectivamente. O teor de carbono fixo médio, considerando somente os testes realizados com os pares termoeletrônicos, foi de 71,77 %. As estimativas de densidade relativa aparente do carvão não sofreram diferenças significativas em função do método de determinação utilizado. O modelo logarítmico foi o que apresentou o melhor ajuste e o menor erro de estimativa de temperatura interna do sistema, em função da temperatura média dos gases eliminados pela chaminé.<sup>1</sup>

Palavras-chave: carvão vegetal, madeira, *Eucalyptus*

---

<sup>1</sup> Comitê orientador: Paulo Fernando Trugilho – (orientador); José Reinaldo Moreira da Silva, Lourival Marin Mendes – (co- orientadores).

## ABSTRACT

ASSIS, Claudinéia Olímpia. Alternative System for Wood Carbonization. Lavras; 2007. 47p. (Dissertation – Master in Wood Science and Technology),  
<sup>1</sup>Federal University of Lavras, Lavras (UFLA).

The production of charcoal is a activities which depends on the raw material, labor and production system. The raw material needs to possess some characteristics such as, for example, a high lignin content and elevated basic density to warrant an increased production of charcoal. The production system must warrant an adequate working condition seeking to establish strategies for a shorter time of the carbonization cycle without altering the yield and quality of the produced charcoal. This study was intended to test, evaluate and adjust an alternative system for wood carbonization in pilot scale including the construction and test of a prototype. *Eucalyptus* ssp woods 1,15 m long and diameter ranging from 6 to 15 cm were utilized. In the general evaluation of the system, 12 tests were performed, where the two former served to promote adjustments and changes in the system aiming to improve their performance. After these alterations, four tests were accomplished for corroboration of the efficiency of the modified system. Next, a six-score multichannel temperature measurer with six thermoelectric pairs for the verification of its thermal profile was installed. The analysis of regression was used to study the relationship existing between average internal temperature of the system and the average temperature of the gases eliminated by the chimney. Three models were adjusted, the linear, the cubic and the logarithmic. From the results, it was found that the average cooling times were 10 and 37,5 hours; for the cooling condition inside and outside the isolating unit, a reduction of 73,33 % in the cooling time being observed. The physical yield of the system presented a mean of 4,35 and 2,0 kg/h for the cooling outside and inside the isolating unit, respectively. The average content of fixed carbon, considering only the tests performed with the thermoelectric pairs was of 71,77 %. The estimates of apparent relative density of the coal underwent no significant differences as related to the determination method utilized. The logarithmic method was the one which presented the best adjustment and lowest estimative error of internal temperature of the system as related to the average temperature of the chimney-eliminated gas.<sup>1</sup>

Key-words: vegetal charcoal, wood, *Eucalyptus*

---

<sup>1</sup> Guidance Committee: Paulo Fernando Trugilho – (adviser); José Reinaldo Moreira da Silva, Lourival Marin Mendes – (co-adviser)



## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, existe a tradição do emprego dos recursos naturais renováveis como fonte de energia, onde a madeira é amplamente utilizada para esta finalidade. A energia hidráulica, a madeira, o bagaço de cana e outras fontes primárias contribuem com aproximadamente, 44,7 % do total do consumo energético nacional. Somente a madeira contribui com 13,1 % do consumo total (Brasil, 2006). A biomassa florestal, que ocupa grande extensão de nosso território, possui riquíssimo potencial energético, o que provoca impacto positivo sobre a demanda de outros recursos energéticos de custos mais elevados, além de ser um recurso renovável.

A disponibilidade de material lenhoso proveniente de florestas nativas permitiu o desenvolvimento crescente da siderurgia a carvão vegetal. Não se pode negar que a atividade de produção de carvão vegetal, quando praticada junto ao desmatamento, gera altos impactos em relação à questão ambiental. Tal situação tem levado ao estabelecimento de programas de reflorestamento com espécies de rápido crescimento para o atendimento da demanda de madeira. Com isso, a produção nacional de carvão vegetal, considerando-se a variação de estoques, perdas e ajustes, é aproximadamente equivalente ao consumo. Sendo assim, a maior parcela de carvão vegetal produzida e consumida no país provém de florestas plantadas, cerca de 75 % contra 25 % de florestas nativas (AMS, 2006). No entanto, algumas importantes empresas do setor siderúrgico possuem índices que chegam a 100 % de auto-suficiência.

Outro fator importante é quanto ao sistema de carbonização a ser utilizado. Em termos práticos, pode-se dizer que a quase a totalidade deste carvão é obtida em fornos de alvenaria.

Do ponto de vista do sistema de carbonização a ser adotado, sabe-se que algumas empresas têm investido em sistema voltado ao

aumento da produção e na queima dos gases gerados, o que reduz drasticamente o problema de poluição do ar. Todavia, existe uma carência de alternativas viáveis economicamente para o desenvolvimento de protótipos de sistemas de carbonização que incorpore ação, tanto em relação ao aumento da produtividade como na melhoria das condições de vida do carvoeiro. Por isso, a maioria do carvão vegetal é ainda produzida em sistema de carbonização rudimentar que, além de ser menos eficiente, expõe o trabalhador a condições fortemente insalubres. É de notório conhecimento que, no Brasil, utilizam-se fornos de carbonização de madeira, em alvenaria, os quais levam a perdas consideráveis dessa matéria-prima, devido à baixa taxa de conversão madeira/carvão vegetal.

Também torna-se necessário desenvolver protótipos de sistemas de carbonização que visem, além do aumento da produtividade, proporcionar menos esforços físicos aos trabalhadores e expô-los a condições dignas de trabalho.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo geral de avaliar, testar e ajustar um sistema alternativo para carbonização de madeira, em escala piloto. Os objetivos específicos foram: I) construção e teste de um protótipo em alvenaria; II) melhorar e facilitar as condições de trabalho dos carvoeiros, possibilitando menor tempo de esfriamento, sem reduzir o rendimento e qualidade do carvão vegetal produzido e III) verificar a relação funcional entre a temperatura média interna e a temperatura média dos gases eliminados pela chaminé.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A produção de carvão vegetal é uma atividade tradicional e econômica, de importância crescente no Brasil e em muitos países em desenvolvimento, e estima-se que continuará crescendo significativamente no futuro. No Brasil, embora o carvão vegetal de uso industrial seja produzido há quatro séculos, sua produção, em metros cúbicos, alcançou a maturidade na década de 1960. A produção de carvão vegetal atingiu o seu pico em 1989, quando foram produzidos, 44,8 milhões de m<sup>3</sup>, comparado aos 26 milhões de m<sup>3</sup> em 1996 a aos 25,4 milhões de m<sup>3</sup> em 2000 (Calle, et al., 2005). Este mesmo autor relata que a maior parte do carvão vegetal é produzida a partir de florestas nativas, mas nas duas últimas décadas, tem ocorrido a sua substituição gradual pelas florestas plantadas. Em 1970, por exemplo, cerca de 90 % do carvão vegetal originava-se de florestas nativas. Essa proporção caiu para 28 % em 2000, tendo o restante sido produzido a partir dos reflorestamentos.

Hoje, o Brasil é o maior produtor de carvão vegetal do mundo. Em 2005, o país produziu 9,7 milhões de toneladas (40 milhões de m<sup>3</sup>), cerca de 25 % da produção mundial. Sendo a madeira de reflorestamento utilizada em cerca de 75 % da produção de carvão vegetal (AMS, 2006). Cerca de 90 % do carvão produzido no Brasil é utilizado no setor industrial, principalmente no setor siderúrgico (Pinheiro et al., 2006). O estado de Minas Gerais destaca-se, no cenário nacional, como o maior produtor e consumidor de carvão vegetal, em razão de seu parque siderúrgico, tendo consumido, em 2005, cerca de 67 % da demanda nacional, que corresponde a 25,2 milhões de metros de carvão (AMS, 2007).

Portanto, as florestas artificiais passaram a ter participação fundamental e de destaque na oferta interna de energia da biomassa. Em Minas Gerais, existe, hoje, a plantação de 2 milhões de hectares de várias espécies de *Eucalyptus*,

selecionadas devido a sua boa adaptabilidade ao solo e ao clima da região nordeste do estado, produzindo carvão de boa qualidade a custos competitivos (Pinheiro et al., 2006).

## **2.1 Sistemas de produção**

O uso difundido do carvão vegetal ao longo da história permitiu o desenvolvimento de diversos tipos de fornos para a sua produção. Muitos fornos ainda existem até hoje. Entretanto, a carbonização da madeira é um processo conhecido há, pelo menos, 10.000 anos, tendo evoluído muito pouco durante todo este tempo (Pinheiro et al., 2006).

Segundo Almeida & Rezende (1983), o objetivo maior da carbonização é aumentar o teor de carbono fixo na madeira, por meio de tratamento térmico. Para que isso aconteça, é necessária a ocorrência de vários processos, tanto físicos como químicos. O processo de carbonização pode ser entendido ao se estudar o comportamento dos três principais componentes da madeira: a celulose, as hemiceluloses e a lignina. Compreendendo o comportamento desses componentes é possível compreender como se realiza a carbonização (Oliveira et al., 1982).

A carbonização é a transformação térmica da madeira na presença controlada de oxigênio ou ar e com calor sendo fornecido por uma fonte externa, enquanto que a combustão é a transformação térmica em presença de oxigênio ou ar, em quantidade suficiente para promover sua decomposição completa (Valente & Lelles, 1983).

Segundo Medeiros & Rezende (1983), a carbonização também pode ser dividida em quatro etapas, de acordo com a temperatura:

a) abaixo de 200 °C: secagem e início da decomposição térmica da madeira;

b) de 200° a 280 °C: predominância de reações endotérmicas, com liberação de ácido acético, metanol, água, CO<sub>2</sub>, etc.;

c) de 280° a 500 °C: predominância de reações exotérmicas que levam a liberação de gases combustíveis, como CO, CH<sub>4</sub>, etc. e alcatrões;

d) acima de 500 °C: o carvão já é bem estável e apenas pequenas quantidades de materiais voláteis, principalmente H<sub>2</sub>, são liberadas.

A decomposição térmica, ou pirólise da madeira, pode resultar em um produto gasoso ou em outros produtos de valor energético, como é o caso do carvão vegetal, cuja menor umidade, assim como uma maior densidade energética e homogeneidade, é uma vantagem de particular interesse. O balanço de materiais típicos para a produção de carvão vegetal a 450 °C, em um forno de laboratório, é apresentada na Tabela 1.

TABELA 1 Balanço de materiais para a carbonização da madeira, a 450 °C, em laboratório.

Material		Entrada		Saídas	
Madeira seca	kg	Conteúdo de carbono (%)	Material	kg	Conteúdo de carbono (%)
	100	47,5	Carvão vegetal	42,0	74,34
			Gases não condensáveis	20,0	34,2
			Ácido pirolenhoso	33,5	19,4
			Alcatrão	4,5	64,5

FONTE: (Nogueira et al., 2003).

## **2.2 Classificação dos fornos de carbonização**

Os fornos utilizados para a carbonização da madeira podem ser classificados de várias formas, a saber, que são descritas a seguir.

### **2.2.1 Quanto à fonte de energia**

Nessa categoria, os fornos são classificados, segundo Pinheiro et al., (2006), em:

1) combustão controlada de parte do material (fonte interna): a carbonização se inicia com a introdução controlada de ar no forno, de modo a queimar parte da lenha contida e aquecer o forno até atingir a temperatura de carbonização. Os fornos mais utilizados, que funcionam com base neste princípio, são os fornos medas, fornos de alvenaria, fornos de encosta e fornos metálicos;

2) fornalha externa (fonte externa): a combustão é realizada em uma fornalha externa ao forno. Os gases quentes dos produtos da combustão são introduzidos no forno para secar a lenha e realizar a carbonização. Este sistema é um pouco mais caro e de construção mais complicada, mas possui um melhor controle de operação, consome menor quantidade de madeira para iniciar o processo de carbonização e produz um carvão de melhor qualidade e com maior rendimento;

3) recirculação de gases ou aquecimento indireto (Retorta): são fornos de carbonização que utilizam uma fonte externa de calor para aquecer a biomassa contida em uma câmara fechada. Podem ser de funcionamento contínuo ou em batelada. Devido ao alto investimento da planta de grande escala, não são economicamente viáveis, se o objetivo único for a produção de carvão vegetal.

### **2.2.2 Quanto à mobilidade**

Quanto a este aspecto os fornos podem ser:

- 1) fixos;
- 2) portáteis.

### **2.2.3 Quanto à continuidade**

Neste aspecto, os fornos podem ser segundo Nogueira et al., (2003):

1) fornos contínuos: possuem eficiência mais alta, porém, são mais sofisticados e caros, e ainda não são aplicados comercialmente, constituindo temas de pesquisas e desenvolvimento, sobretudo de grandes empresas consumidoras de carvão vegetal, como algumas siderúrgicas brasileiras;

2) fornos descontínuos: são os mais empregados, constituindo a maioria dos fornos brasileiros, os quais trabalham por cargas ou bateladas. Os fornos descontínuos são de modelos fixos, entretanto existem fornos metálicos móveis.

### **2.2.4 Quanto à evolução**

Nesta categoria, podem se classificar os fornos que pertencem aos seguintes sistemas:

- 1) Primitivo

O sistema primitivo de carbonização de madeira é formado pelas medas ou caieiras. Este inicia-se pela arrumação de uma pilha de 40 a 50 m<sup>3</sup> de lenha na forma circular (balão), em um terreno plano e limpo, chamado praça. Em seguida, cobre-se a pilha de lenha com uma camada de folhas e capim, e, depois, se coloca outra camada de 10 a 25 cm de terra, deixando uma frente aberta para o acendimento. A produtividade típica é de cerca de 30 m<sup>3</sup>/homem/mês (Baêta, 1946, citado por Pinheiro et al., 2006). O controle da carbonização desses fornos é difícil, requerendo um acompanhamento constante durante todo o ciclo da carbonização, principalmente nas primeiras 24 horas, devido à movimentação e

à queda da camada de terra, permitindo a entrada de ar e combustão completa da carga da madeira. O tempo de carbonização desses fornos é de 8 a 12 dias, podendo chegar a 40 dias, para as grandes medas. Apresentam, em sua maioria, rendimentos muito baixos. A avaliação de centenas de fornos na África apresentou rendimentos de carbonização de 8% a 9%. Os fornos caeira ou meda são, geralmente, usados em áreas pobres e sem recursos, sendo ainda utilizados nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. (Pinheiro et al., 2006).

## 2) Convencionais

Com a necessidade de melhorar a eficiência da carbonização, surgiram os sistemas convencionais ou descontínuos, os quais originaram os diversos tipos de fornos de carbonização.

São vários os tipos de fornos existentes, sendo os mais comuns os fornos de alvenaria, como o de superfície, rabo quente e encosta. As vantagens desses fornos são:

- 1- facilidade de vedação das entradas de ar;
- 2- fácil controle da manobra de carbonização;
- 3- baixo custo;
- 4- fácil construção;
- 5 a possibilidade de deslocamento acompanhando a exploração florestal.

Os fornos de alvenaria convencionais possuem certas desvantagens que podem ser enumeradas, conforme Almeida & Rezende (1982):

- 1- baixo rendimento gravimétrico, com a conseqüente subutilização da biomassa lenhosa;
- 2- as fumaças da carbonização são liberadas diretamente para o ambiente, contaminando os trabalhadores e o ambiente circundante;



3- as paredes de alvenaria oferecem grande resistência à transmissão de calor, o que faz com que sejam necessários dias para o resfriamento do carvão a temperaturas que possibilitem manuseio, carga e transporte;

4- o carvão vegetal apresenta qualidade variável, em função da sua posição do forno e, assim, em uma mesma fornada, são obtidos carvões em diferentes estados de decomposição térmica, ou seja, de madeira pouco decomposta (tiços) no chão do forno até o carvão com teor de carbono fixo em 80% que se forma na parte superior da carga enforada;

5- a carga de lenha e a descarga do carvão são feitas manualmente, exigindo grande esforço físico por parte dos trabalhadores;

6- a produção não leva em conta parâmetros de qualidade de carvão vegetal importantes para indústrias consumidoras, tais como, composição química, poder calorífico, densidade a granel e resistência mecânica;

7- o treinamento é extremamente dificultado em função do empirismo com que se conduz a carbonização nos fornos de alvenaria por meio da coloração de fumaças, temperatura externa das paredes do forno, aparência dos tatus, etc.;

8- dificuldade de padronizar a rotina de carbonização em fornos de alvenaria.

### **2.2.5 Fornos de encosta**

O forno de encosta foi introduzido no Brasil em 1946, por Alvim Brandão. Durante muitos anos, esses fornos foram responsáveis pela produção total do carvão consumido pelas indústrias siderúrgicas de Minas Gerais. São fornos cilíndrico-esféricos, com diâmetro entre 3 e 4 m, altura entre 2,5 e 2,8 m, escavados em barrancos de terrenos firmes em regiões de topografia mais acidentada. A principal característica do forno é a de aproveitar o desnível natural de terrenos acidentados. Para construí-lo, corta-se o barranco com a

forma circular, apoiando-se a copa de forma de uma semi-esfera sobre a borda do terreno, que funciona como se fosse a parede do forno.

A taxa de conversão dos fornos de encosta pode ser de 35 % a 38 %, graças ao bom perfil térmico que possuem, bem mais homogêneo que os fornos de superfície. As desvantagens são a pequena capacidade de carga, 20 stéreo (st) de lenha e 10 m<sup>3</sup> de carvão e o resfriamento lento, o que provoca redução da produtividade física do forno (Mendes et al., 1982).

### **2.2.6 Forno rabo quente ou biscoiteiro**

A maior parte do carvão vegetal do Brasil é produzida por pequenos produtores em fornos de alvenaria de superfície do tipo rabo quente, o que se deve à sua simplicidade construtiva e baixo custo. É um dos mais difundidos, principalmente entre pequenos produtores, sendo recomendado para locais planos, geralmente são construídos em baterias ou conjuntos de fornos. O forno rabo quente é construído apenas com tijolos de barro cozido e argamassa de barro, areia e água. A argamassa é utilizada em quantidades que produzam um barro fácil de trabalhar. A mistura de areia tem o objetivo de reduzir as trincas que aparecem no forno durante as carbonizações. (Mendes et al., 1982). Estes fornos, geralmente, têm entre 2,9 e 3,8 m de diâmetro na base, cerca de 2,30 m de altura máxima, com capacidade máxima de 8 st de lenha, produzindo de 3,8 m<sup>3</sup> de carvão. O controle de operação é realizado pelos orifícios de entrada de ar e saída dos gases. O processo da carbonização é avaliado pela coloração da fumaça que sai pelos orifícios. Algumas características desse forno podem ser:

1- baixo rendimento gravimétrico (carvão/madeira seca), devido às suas características rudimentares e excesso de queima de lenha;

2- o carvão vegetal apresenta qualidade variável, em função de sua posição no forno, de madeira pouco decomposta, denominada de ticos, até carvão com elevado nível de carbono fixo;

3- controle empírico da carbonização por meio de fatores subjetivos, tais como os gases e o calor da parede de alvenaria, pelo tato do carbonizador. Isso impede um controle adequado da temperatura e a taxa de aquecimento, que são importantes para a qualidade do carvão, independente do nível de treinamento.

A operação do forno compreende o seu carregamento, isto é, a colocação da lenha no seu interior, a carbonização e a descarga do carvão produzido. Depois de feito o carregamento do forno, procede-se ao fechamento da porta e ao acendimento. O acendimento é feito com materiais que pegam fogo com facilidade, tais como tiços ou gravetos.

Diversos fatores podem contribuir, em maior ou menor grau, para o desenvolvimento não uniforme da carbonização. Entre outros, podem ser mencionados o carregamento mal feito do forno, a lenha não uniforme, tanto em termos de dimensões quanto em termos de umidade e as condições climáticas como ventos fortes e chuvas.

Para o descarregamento do forno, a temperatura ideal é de aproximadamente 60 °C. Não se deve abrir um forno que não esteja suficientemente frio, pois a entrada de ar irá provocar o incêndio do carvão. O tempo ideal de corrida de um forno é de sete dias, desde o acendimento do fogo até a retirada do carvão. São três dias para carbonizar, três para esfriar e um para descarregar/encher o forno (Mendes et al., 1982).

A operação do forno rabo quente é semelhante àquela do forno de encosta. O controle da carbonização é feito com base na quantidade e na cor dos gases que saem pelas chaminés. Como o forno possui, geralmente três chaminés, e nem sempre à frente de carbonização desenvolve-se de maneira uniforme, é possível que o aspecto da fumaça em cada uma das chaminés não seja o mesmo no decorrer da carbonização. Para o controle da carbonização procede-se ao fechamento das entradas de ar, para reduzir a velocidade da frente de carbonização (Mendes et al., 1982).

Quando a fumaça torna-se pouco densa e de coloração azulada em determinada chaminé, fecham-se todas as entradas de ar mais próximas, pois esta é uma indicação de que a frente de carbonização já atingiu o fundo do forno na região daquela chaminé (Mendes et al., 1982).

### **2.2.7 Fornos cilíndricos de superfície**

Os fornos de superfície são os mais utilizados pelos grandes produtores de carvão vegetal, e muito utilizado no Brasil, pelas médias e grandes empresas siderúrgicas integradas com produção própria. Este forno tem dimensões de 3 a 8 m de diâmetro na base, sendo o de 5 metros o mais comum, altura entre 2,3 m e 5,0 m e volume efetivo entre 5 e 200 toneladas de madeira.

As características são mais parecidas com a do forno rabo-quente, com a vantagem de possuir uma chaminé lateral com tiragem central, o que melhora as condições térmicas e o fluxo de gases dentro do forno.

Os fornos de superfície, pelas suas características de construção, apresentam melhores condições que os anteriormente descritos, pois, a frente de carbonização se propaga de maneira mais homogênea e sob melhor controle do operador (Mendes et al., 1982). A operação deste forno tende a ser mais simples devido, principalmente, à existência de apenas uma chaminé e à possibilidade de utilizar as filas e tatus para acompanhar o desenvolvimento da frente de carbonização. Como nos fornos anteriores, no início da carbonização, os gases tendem a sair pelas baianas; em seguida passarão a ser expelidas pela chaminé e então, deverá ser concentrada a atenção no forno. É o aspecto dos gases que indica o desenvolvimento da carbonização. Além disso, a propagação da frente de carbonização pode ser acompanhada avaliando-se a temperatura externa da parede e por meio da inspeção visual e sondagem de filas e tatus (Mendes et al., 1982).

### 2.2.8 Forno de superfície com câmara de combustão externa

Este forno é muito parecido com o de superfície, porém, possui uma câmara externa para o início da carbonização. Neste tipo de forno, o calor para a carbonização da lenha é fornecido pela queima, na câmara de lenha ou qualquer outro tipo de material como cascas e galhadas que normalmente, não são aproveitados (Marri et al. (1982), citados por Pimenta (2000)).

A Acesita utiliza um forno de superfície com câmara de combustão externa. Nele, uma pequena quantidade de madeira é queimada na câmara, para secar a carga e acender o forno. Quando o processo de ignição se completa, o processo de carbonização é totalmente controlado pela quantidade de ar que entra pela câmara de combustão, não existindo orifícios de entrada e ar no corpo do forno. O esquema do forno de superfície com câmara de combustão externa encontra-se na Figura 1.

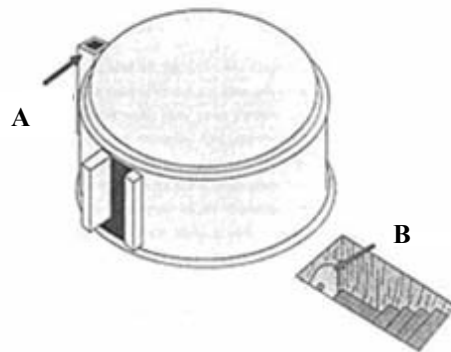


FIGURA 1 Forno de superfície com câmara de combustão externa, em que A = chaminé e B = câmara externa.  
FONTE: CETEC, 1982.

O consumo de lenha na câmara é de cerca de 3 % a 5 % da lenha enforada. O ciclo de carbonização dura 8 dias, sendo o carregamento de 1 dia; a carbonização, de 3 dias, o resfriamento, 3 dias e a descarga, 1 dia. A Belgo-

Mineira utiliza fornos de superfície de 8 m de diâmetro com capacidade de 160 st, produzindo cerca de 80 m<sup>3</sup> de carvão. Estas dimensões permitem a descarga mecânica e facilitam a operação de descarregamento (Pinheiro et al., 2006).

Depois de acessa a câmara, o controle da carbonização se dá pela quantidade de ar que se deixa entrar em seu interior. Em princípio, a câmara deve ser mantida acesa durante toda a fase de carbonização. Portanto, a alimentação da câmara deve ser feita de tal maneira que não falte lenha para queima e que não seja queimada lenha em excesso. Ao final da carbonização, a porta da câmara e a janela existente em sua parte inferior são fechadas e vedadas com barro, iniciando-se a fase de resfriamento (Mendes et al., 1982).

A utilização de câmaras em fornos convencionais de tijolos não é novidade. No entanto, só recentemente tal idéia passou a ser preconizada em nosso país. Há informações, obtidas em testes experimentais, de que a produtividade do forno de alvenaria adaptado com câmara externa, quando comparada à produtividade do forno convencional, é 30 % mais elevada (Mendes et al., 1982).

### **2.2.9 Fornos metálicos**

Os fornos metálicos, de diferentes formas e tamanhos, têm a vantagem de serem móveis, podendo sempre ser instalados próximos às áreas de corte de madeira. Têm a desvantagem de perder muito calor pelas paredes, proporcionando baixos rendimentos, comparados aos fornos de alvenaria. Em Uganda, foi desenvolvido um forno metálico, modelo Mark. É um forno pequeno, construído com chapas metálicas de 4,0 mm e com capacidade para cinco estéreos de lenha, produzindo 2 metros de carvão por corrida. O tempo total de operação é de dois dias, o que permite até 15 corridas por mês. O interessante deste forno é que ele é construído de dois anéis e uma cúpula, que

são desacoplados após a carbonização, deixando o carvão sobre o solo. As quatro chaminés fazem um rodízio com as entradas de ar e as saídas de gases.

Este tipo de forno é muito aconselhado para a carbonização de resíduos de madeira, quer provenientes da exploração, quer provenientes da indústria, como serrarias e carpintarias (Almeida & Rezende, 1982).

### **2.3 Processos industriais**

Dentro dessa categoria, podem-se citar exemplos de fornos contínuos e descontínuos.

#### **2.3.1 Processo Reichert-Lurgi**

Desenvolvido por volta de 1935 e também conhecido como processo DEGUSSA, é, na verdade, um processo descontínuo, mas como, geralmente, na planta de carbonização, são operados vários fornos de maneira simultânea, prevalece um caráter contínuo ao processo com um todo (Wenzl, 1970). Na retorta vertical, com um volume de 1000 m<sup>3</sup> o calor é introduzido pelo topo, através de gases quentes. A velocidade de carbonização é controlada pela vazão e pela temperatura dos gases de circulação. A carbonização se inicia no topo da retorta e avança em direção ao fundo, no mesmo sentido de fluxo de gás (Wenzl, 1970).

Os produtos de destilação são separados dos gases não condensáveis ao passarem em resfriadores, separados de alcatrão e lavadores de gases. Partes dos gases não condensáveis são retiradas do sistema para serem usadas 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, aproximadamente 18 horas, o carvão é descarregado em silos para resfriamento (Almeida & Rezende, 1982).

Uma dificuldade deste processo é a coordenação entre os diferentes tempos de secagem, carbonização e resfriamento do carvão, para que se obtenham bons rendimentos térmicos. Outra dificuldade é a necessidade de grandes equipamentos de condensação e separação dos gases de circulação e produtos de carbonização (Almeida & Rezende, 1982).

### **2.3.2 Processo Sific-Lambiotte**

Trata-se de um processo integrado, objetivando a produção de carvão, produtos químicos e combustíveis, conforme o processamento da fração pirolenhosa. O contato direto dos gases de reciclo com a carga é utilizado não só para propiciar a troca de calor necessária à secagem final, aquecimento e carbonização da madeira, mas também para promover o resfriamento do carvão (Almeida & Rezende, 1982).

De acordo com Almeida & Rezende (1982), a umidade da madeira recém-chegada da floresta é reduzida até 15 % num forno cilíndrico vertical, pela ação dos gases quentes, provenientes da combustão de parte dos gases-não condensáveis produzidos na pirólise. Tanto a carga quanto a descarga do forno de secagem são automatizadas. A alimentação é feita pelo topo, por meio de um skip, comandado por um controlador de nível de madeira no secador. Da descarga do forno e secagem, a madeira é colocada em skips, que levam à parte superior do forno de carbonização. O forno de carbonização é do tipo cilíndrico vertical como o secador e pode ser dividido em 3 partes, que são:

1- parte superior: de alimentação, provida de um compartimento estanque, que impede a entrada de ar e ou a saída de gás;

2- parte intermediária: nesta porção, ocorre a carbonização propriamente dita e estão localizados os dispositivos de insuflação dos gases quentes e vapores de resfriamento. Estes dispositivos foram criados para permitir, ao mesmo



tempo, uma circulação controlada de gases e um bom escoamento do carvão vegetal;

3- parte interior: onde ocorre o resfriamento e descarga do carvão. Trata-se de um compartimento estanque, com válvulas de segurança controladas por cilindros pneumáticos externos.

Os vapores extraídos do forno de carbonização são resfriados, o licor pirolenhoso é separado e os gases condensados são recuperados (Almeida & Rezende, 1982). Os gases pirolenhosos são distribuídos em 4 direções, a saber:

1- uma parte é enviada a zona de carbonização do forno, fornecendo o suplemento de calor necessário ao processo;

2- uma segunda parte é utilizada no resfriamento do carvão, na parte inferior do forno;

3- uma terceira parte é utilizada no forno de secagem da madeira;

4- uma quarta parte excedente ao processo fica disponível para a geração de vapor.

O licor pirolenhoso, contendo água, alcatrão e os chamados ácidos pirolenhosos, passa por uma série de tratamentos que permitem a recuperação de vários produtos químicos importantes (ácido acético, metanol, aromatizantes alimentares, solventes, etc.) (Almeida & Rezende, 1982).

### **2.3.3 Processo IPT**

O processo foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT.) Foi instalada uma planta piloto com capacidade para processar 150 kg/hora de cavacos de madeiras leves (eucaliptos e pinus) e até 450 kg/hora de material mais denso (casca de coco de babaçu e pellets de folhas de eucalipto). A matéria-prima é picada ou peletizada para se obter a granulométrica adequada ao seu processamento e, então, enviada ao secador

para a redução da umidade a, aproximadamente, 10 % (Almeida & Rezende, 1982). A energia consumida na secagem é fornecida pelo contato direto dos gases quentes provenientes da combustão de parte dos gases não condensáveis gerados na pirólise. Do secador, a matéria-prima é levada por transportadores de caçamba até o silo de material seco. Devido à utilização de matéria-prima e à insuflação de gases quentes na porção intermediária do forno de carbonização, o ciclo térmico de produção é rápido, o que aperfeiçoa os rendimentos em condensados. O carvão é descarregado pelo fundo do forno de carvoejamento, para posterior resfriamento. Os voláteis são retomados no topo do forno, passando por condensadores para a recuperação do alcatrão e da fração aquosa e limpeza do gás não-condensável.

O gás não-condensável é enviado à câmara de combustão e os gases quentes produzidos retornam ao sistema nos pontos em que o suplemento de energia é necessário. A rapidez do ciclo térmico induz a produção de um alto percentual de alcatrão de 29 %, em detrimento do rendimento do carvão. Um aquecimento muito rápido da madeira acelera a velocidade da reação da carbonização, o que provoca uma rápida liberação dos voláteis (Almeida & Rezende, 1982).

#### **2.3.4 Fornos retangulares da Vallourec & Mannesman**

São fornos de grande capacidade volumétrica (200 st), construídos para permitirem carga e descarga mecanizadas. Possuem o mesmo princípio dos fornos de superfície, porém, devido ao seu grande tamanho, a cinética da carbonização é bastante irregular dentro do forno, produzindo um carvão com qualidade muito variável. Possuem sistema de recuperação de alcatrão. O tempo de residência da madeira no forno é da ordem de 12 a 15 dias (Shout et al., 2000).

### 2.3.5 Fornos de carbonização contínua em módulos horizontais

De acordo com Lúcio et al. (2000), este modelo de forno consiste em diversos reatores interligados entre si por um sistema de válvulas, que permite o fluxo dos gases pelos reatores, secando a madeira, carbonizando e resfriando. Permite a utilização madeiras de diferentes dimensões. Os custos iniciais de um sistema deste são da ordem de US\$ 150.000.

### 2.3.6 Fornos de carbonização contínua em módulos verticais

Este forno consiste em dois reatores verticais, sendo um deles em aço inoxidável, com capacidade mensal de 1.250 t/mês. No primeiro reator, a madeira é secada, já no segundo, ela é carbonizada. A qualidade do carvão obtida com este sistema é apresentada na Tabela 2.

TABELA 2 Qualidade do carvão vegetal

Características	Valor
Carbono fixo	85 % a 93 %
Poder calorífico	8.100 kcal a 8.300 kcal
Voláteis	8-9 %
Cinzas	Até 2 %
Umidade	1 a 5 %

FONTE: (Schout et al., 2000).

As principais limitações do sistema de carbonização contínua em módulos verticais são o preço, algo em torno de US\$ 2.500.000 e o tamanho das toras, que são de 25 a 30 cm de comprimento, exigindo grande quantidade de mão-de-obra para o corte dos toretes, além de perda de matéria-prima.

### **2.3.7 Forno contêiner**

O forno container tem elevada produtividade, comparado aos fornos tradicionais. Este forno foi desenvolvido e está sendo aperfeiçoado no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira da Universidade Federal de Viçosa e tem como objetivo melhorar a qualidade do carvão produzido, aumentar a produção, humanizar o trabalho e reduzir os custos de produção (Pimenta & Barcelos, 2000). O sistema possui as seguintes características:

a) consiste de um sistema durável, não necessitando de reparos contínuos, como os fornos de alvenaria tradicionais. Esse sistema pode ser parcialmente ou totalmente mecanizado;

b) possui rápido resfriamento do carvão vegetal, aproximadamente dez horas, em detrimento aos três a quatro dias nos sistemas convencionais;

c) humaniza o trabalho nas carvoarias porque a carbonização dura de 8 a 10 horas, o trabalho pode ser organizado em turnos e o operador não necessita vigiar a carbonização dia e noite;

d) os trabalhadores não ficam expostos à inalação das emissões poluentes, pois podem-se recuperar o alcatrão vegetal e os líquidos pirolenhosos, utilizando-se o sistema de condensação. Caso não seja de interesse recuperar o alcatrão, as fumaças do leito de carbonização podem ser conduzidas a um queimador e incineradas, gerando calor sensível, que pode ser aproveitado para a geração de vapor ou a secagem da lenha (Pimenta & Barcelos, 2000).

As características deste forno, quanto à melhoria da qualidade do carvão, podem ser assim avaliadas:

a) o controle de carbonização é feito por controle de temperatura e não por coloração de fumaças e outros critérios subjetivos, permitindo um controle da qualidade do processo de produção;

b) a descarga mecanizada do carvão reduz a emissão de finos;

c) é obtido carvão de boa qualidade no forno contêiner, apresentando o produto, as mesmas propriedades ou melhores (composição química, densidade, resistência mecânica, poder calorífico, etc.) do carvão produzido em forno de alvenaria ou retorta de laboratório, com a vantagem de que, no forno contêiner não são incorporados minerais estranhos, como ocorre durante o manuseio do carvão em carvoarias tradicionais;

d) podem ser obtidos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, na faixa de 35 % a 38 %, contra de 25 % a 33 %, nos fornos de alvenaria tradicionais. A operação do forno consiste em se encapsular contêiner cheio de madeira dentro do poço isolante e iniciar o processo de carbonização de forma parecida com o forno de superfície com câmara de combustão externa (Pimenta & Barcelos, 2000).

Podem ser executadas carbonizações em até 10 horas. Durante a carbonização, o forno está encapsulado dentro do poço de alvenaria. Ao terminar a carbonização, o contêiner é retirado, podendo ocorrer livre troca de calor com o ambiente através da parede metálica, de forma que o carvão rapidamente se resfria. A correta circulação e exaustão dos gases é garantida por um ventilador que suga a fumaça do leito da carbonização e a conduz para um sistema de condensação, onde se recuperam o alcatrão e o líquido pirolenhoso.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo foi projetado, construído, testado e ajustado o protótipo de um sistema alternativo para carbonização de madeira em escala piloto, cujas partes são descritas a seguir:

#### 1) Unidade de carvoejamento

É composta por uma caçamba metálica, com capacidade para, aproximadamente, 1 m<sup>3</sup> de madeira roliça, com tampa metálica, contendo dimensões internas de 1,06 m de comprimento por 1,06 m de largura e 1,15 m de altura. Utilizou-se, na sua confecção, chapa metálica do tipo SAE 1012 e de 6,3 mm de espessura. A unidade de carvoejamento usada pode ser vista na Figura 2.



FIGURA 2 Detalhes da unidade de carvoejamento ou caçamba metálica com tampa.

#### 2) Unidade isolante

Estrutura confeccionada em alvenaria, com espessura de 18 cm (um tijolo). Durante sua confecção, procurou-se deixar uma folga de 5 cm em relação à dimensão externa da caçamba. Esta unidade possui um 1,50 m de altura e nela foi inserida a unidade de carvoejamento. A estrutura de alvenaria possui uma

porta metálica, revestida de lã de vidro para isolamento térmico. A unidade isolante constitui a “alma do forno”, pois permitirá que o sistema não perca energia para o ambiente durante o processo de carbonização. A unidade de carvoejamento foi retirada da unidade isolante, ainda quente, para que a etapa de resfriamento seja realizada ao ar livre, reduzindo o tempo total de carbonização. Na Figura 3 são mostrados detalhes da construção da unidade isolante.



FIGURA 3 Detalhes da construção da unidade isolante.

### 3) Câmara de combustão externa

Todo o sistema foi operado com uma câmara de combustão externa. A câmara de combustão estava a 20 cm de profundidade do solo (abaixo do piso do forno) e possui 25 cm de largura, com porta metálica com revestimento isolante (lã de vidro), comunicando-se diretamente com a base do forno. A comunicação foi feita por meio de quatro entradas de gases quentes. Abaixo de sua porta encontra-se uma abertura retangular, de 25 cm x 5 cm, para a entrada de ar, controlada por uma borboleta. A câmara possui também uma grelha construída de ferro, que funciona como cinzeiro, para limpeza após as bateladas da carbonização. Detalhes da câmara externa são mostrados na Figura 4.



FIGURA 4 Detalhes da câmara de combustão externa.

### 3.1 Construção do protótipo

O protótipo foi construído nas dependências da Unidade Experimental de Secagem e Desdobro da Madeira, do Departamento de Ciências Florestais na Universidade Federal de Lavras. A base do protótipo e as paredes foram construídas com tijolo maciço de barro e argamassa de terra. Foram construídos quatro dutos de seção quadrada, de 7,5 cm x 7,5 cm para entrada de ar quente no interior da unidade isolante, ligados na câmara de combustão. Foi construída uma chaminé, de tiragem central, com seção interna de 15 cm x 15 cm para a saída dos gases.

Na base da unidade isolante foi fixado um suporte metálico, construído em cantoneira, para facilitar a entrada e o posicionamento da unidade de carvoejamento. O suporte foi fixado a uma altura de 20 cm do piso da unidade isolante.

### 3.2 Testes preliminares

Após a construção do sistema foram realizados testes preliminares para o ajuste do seu funcionamento. As carbonizações foram feitas com madeira de *Eucalyptus* spp. existentes na Universidade Federal de Lavras.

Antes das carbonizações foram selecionados 10% do número total de peças, considerando-se as variações diamétricas, as quais ficaram entre 6 e



15 cm, para a determinação da umidade da madeira enfiada. Nas peças previamente selecionadas foram retirados dois discos de 2,5 cm de espessura a  $\frac{1}{4}$  e  $\frac{1}{2}$  do seu comprimento. Os discos foram secos em estufa, com circulação forçada de ar, calibrada à uma temperatura de  $105 \pm 3$  °C. Todas as peças usadas apresentaram comprimento de 1,15 m. Adotou-se, em todas as carbonizações, o seguinte procedimento operacional do sistema:

a) carregamento da unidade de carvoejamento com, aproximadamente, 480 kg de madeira (Figura 5a), em seguida, pesou-se 10% da quantidade de madeira enfiada (48 kg), para alimentação da câmara de combustão externa;

b) introdução da unidade de carvoejamento na unidade isolante com ajuda de uma paleteira (Figura 5b). Após a inserção da unidade de carvoejamento dentro da unidade isolante, levantava-se a sua tampa por meio de um dispositivo apropriado, instalado no teto da unidade isolante. A tampa foi abaixada ao final das carbonizações;

c) imediatamente, fechava-se a porta do forno e lacrava-se com argamassa (mistura de terra, areia e água). Esta etapa evitou a saída dos gases pelas trincas presentes nas paredes de alvenaria;

d) acendimento e manejo da câmara de combustão externa.

Após o acendimento na câmara de combustão, a porta da câmara e a borboleta ficavam totalmente abertas, por um período de 30 minutos, para que ocorresse o início da combustão e o aquecimento da câmara. Após este tempo, a porta da câmara foi fechada e o controle da combustão passou a ser feito pela abertura e fechamento da borboleta, observando-se a intensidade da saída de gases pela chaminé. A alimentação da câmara ocorreu com frequência variável, porém, em intervalos de uma a duas horas, dependendo do consumo e da abertura deixada da borboleta. Utilizou-se, como referência, o tempo ótimo de fogo na câmara de combustão de 13 horas e 15 minutos, determinado por Trugilho et al. (1988).

Na avaliação geral do sistema foram realizados, no total, doze testes, tendo os dois primeiros servidos para promover ajustes e mudanças no sistema, visando melhorar o seu desempenho. Dessa forma, procederam-se as mudanças que podem ser observadas na Figura 5 e que foram:

1) aberturas opostas com sistema de fechamento, (janelas) na unidade de carvoejamento, para permitir a circulação de gases no seu interior (Figura 5 a);



FIGURA 5 (a) unidade de carvoejamento carregada, (b) uso de paleteira para o transporte e colocação na unidade isolante, (c e d) presença de uma chaminé metálica móvel, (e) abertura na entrada de gás na câmara e (f) abertura para a saída dos gases pela chaminé.

2) alteração da entrada de gás quente da câmara de combustão para a unidade isolante (Figura 5e);

3) construção de uma chaminé metálica e móvel de tiragem lateral e em formato de coifa (Figura 5d e f).

Em seguida, foram feitos mais quatro testes no sistema devidamente modificado. Após a realização destes testes e a comprovação da eficiência do sistema modificado, foi instalado um medidor de temperatura multicanal de seis pontos, com seis pares termoeletricos para a verificação do seu perfil térmico. As posições dos termopares no sistema estão apresentadas na Figura 6.

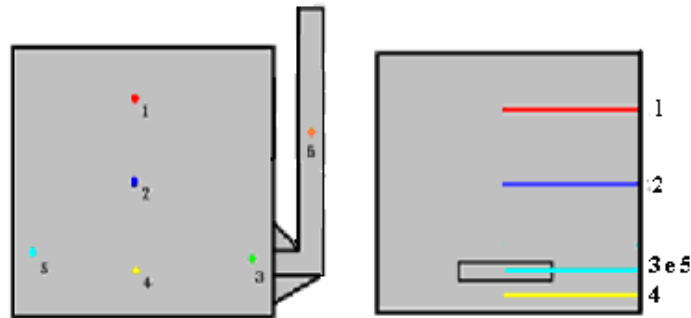


FIGURA 6 Esquema e distribuição dos pares termoeletricos na unidade de carvoejamento.

Com a instalação dos pares termoeletricos foram realizadas mais seis carbonizações no sistema.

### 3.3 Características avaliadas no carvão vegetal

Ao término das carbonizações, todo o carvão vegetal foi medido e pesado, visando à determinação dos rendimentos em carvão vegetal. Posteriormente, foram feitas as análises físicas e químicas utilizando os procedimentos apresentados na Tabela 3.

TABELA 3 Características avaliadas no carvão vegetal.

Característica avaliada	Método Usado
Densidade relativa aparente (g/cm <sup>3</sup> )	a) Método 1: Segundo a norma 167-73 da ASTM (adaptada).
	b) Método 2: Hidrostático 143-94 da ASTM (Peneiras 38 mm).
	c) Método 3: Hidrostático 143-94 da ASTM (Peneira de 25 mm).
Teste de tamboramento	Norma 1375-80 da ABNT
Análise química imediata	Norma 8112 da ABNT
Rendimento gravimétrico (%)	RGC = PCS/PMS*100
Relação volumétrica	Madeira/Carvão (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
Produtividade física (kg/h)	PFC = PCS/Tempo (h)
Classificação granulométrica*	Norma 7405 da ABNT

\* Foram utilizadas na classificação, somente as peneiras de malha de 38, 25 e 12 mm.

A produtividade física do carvão (PFC) foi obtida em relação à massa seca de carvão produzido (PCS) pelo tempo do ciclo da carbonização, desconsiderando o tempo de carga e descarga do sistema.

A relação volumétrica foi determinada levando-se em consideração o volume nominal da unidade de carvoejamento.

Tanto a madeira como o carvão vegetal produzido foram pesados em uma balança, tipo plataforma, com capacidade de  $300 \pm 1$  kg. Os volumes de madeira e carvão vegetal foram obtidos levando-se em consideração o volume nominal da unidade de carvoejamento.

Os procedimentos básicos operacionais foram definidos conforme a necessidade de intervenções no sistema para o seu melhor controle. Por exemplo, algumas correções na abertura da borboleta da câmara de combustão, no sentido de controlar a temperatura interna, não deixando que o termopar

número 5, posicionado na janela voltada para o lado da câmara, ou seja, para o lado da entrada do gás no sistema, disparasse, pois, caso isso acontecesse, era sinal que a combustão interna ocorria em grande intensidade. Correções também foram feitas para evitar a elevação demasiada do termopar número 1, posicionado na parte superior da unidade de carvoejamento. Essas correções visavam promover uma maior homogeneidade da temperatura interna da unidade de carvoejamento.

As carbonizações foram conduzidas procurando-se manter a temperatura inicial de carbonização em torno de 200 °C, a fim de não prejudicar a qualidade do carvão produzido e assegurar uma temperatura final em torno de 450 °C. Segundo Mendes et al. (1982), esta temperatura é considerada adequada para a produção de carvão de qualidade razoável para a siderurgia. O controle da temperatura foi obtido atuando-se na abertura da câmara de combustão, de acordo com as temperaturas registradas pelos termopares, reduzindo ou aumentando a entrada de ar para o interior da unidade de carvoejamento.

Para o estudo e a determinação da relação existente entre temperatura média interna do sistema e a temperatura média dos gases eliminados pela chaminé, foi utilizada a análise de regressão. Foram ajustados três modelos, o linear, o cúbico e o logarítmico (Trugilho et al., 1988). A escolha do melhor modelo foi feita com base no coeficiente de determinação corrigido ( $\bar{r}^2$ ), coeficiente de variação (CV), significância da regressão e dos coeficientes de regressão, testados pelo teste F, a 1% de probabilidade.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Características quantitativas do carvão vegetal

Na Tabela 4 são apresentados os valores individuais das carbonizações realizadas no sistema modificado. Observa-se que, apesar da diferença entre as umidades da madeira dos testes com esfriamento da unidade de carvoejamento fora (15,73%) e dentro (28,81%) da unidade isolante, os tempos de carbonização e os rendimentos gravimétricos (RGC) não sofreram diferenças significativas.

TABELA 4 Resultados médios das carbonizações realizadas para a avaliação do sistema.

Testes	Umidade da lenha (%)	Tempo da carbonização (h)	Tempo de esfriamento (h)	Tempo total (h)	RGC (%)	Prod. (kg/h)
1*	14,90	35	13	48	36,07	3,35
2*	14,70	35	19	54	28,61	2,39
3**	16,36	34	10	44	36,42	4,41
4**	16,94	26	10	36	33,83	4,28
<b>Média</b>	<b>15,73</b>	<b>33 a (71%)</b>	<b>13 a (29%)</b>	<b>45</b>	<b>33,73 a</b>	<b>3,61 a</b>
5***	18,40	48	33	81	28,69	1,58
6***	33,10	31	40	71	35,63	1,91
7****	38,21	36	36	72	34,90	2,52
8****	22,69	32	41	73	29,30	1,72
9****	25,89	35	40	75	32,02	2,01
10****	34,55	34	35	71	32,87	1,74
<b>Média</b>	<b>28,81</b>	<b>36 a (49%)</b>	<b>38 b (51%)</b>	<b>74</b>	<b>32,24 a</b>	<b>1,91 b</b>

\*, \*\* Esfriamento fora da unidade isolante sem e com os pares termoeletricos, respectivamente. \*\*\*, \*\*\*\* Esfriamento dentro da unidade isolante sem e com os pares termoeletricos, respectivamente. Valores seguidos de mesma letra minúscula, na coluna, não diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Os testes 1 e 2 tiveram esfriamento fora da unidade isolante sem a presença dos pares termoeletricos, os testes 3 e 4 tiveram esfriamento fora da unidade isolante, com a presença dos pares termoeletricos. Os testes 5 e 6 tiveram esfriamento dentro da unidade isolante, sem a presença dos pares termoeletricos e os testes 7 a 10 tiveram esfriamento dentro da unidade isolante, com a presença dos pares termoeletricos.

O tempo médio de esfriamento determinado com o auxílio dos pares termoeletricos foi 10 e 38 horas, para a condição fora e dentro da unidade de isolante, respectivamente, ou seja, uma redução de 73,33 % no tempo de esfriamento. Observa-se, ainda, que o tempo de esfriamento médio sem o uso dos pares termoeletricos para a condição fora da unidade isolante foi bem menor (16 horas) que o realizado dentro da mesma unidade (36,5 horas), indicando uma redução de 56,16 % no tempo de esfriamento. O esfriamento fora da unidade de carvoejamento leva a uma redução do tempo total de carbonização que varia de 31 % a 45,80 % com médias de 38,35 %.

O rendimento gravimétrico médio da carbonização, com esfriamento fora e dentro da unidade de carvoejamento, foi de 33,73 % e 32,24 %, respectivamente. Estes valores estão de acordo com os obtidos nos trabalhos de Bastos Filho (1986), Ferreira (1988) e Trugilho et al. (1989).

A produtividade física apresentou valores médios de 3,61 e 1,91 kg/h, respectivamente, para o esfriamento ocorrendo fora e dentro da unidade isolante. Considerando-se os valores de produtividade física obtidos com as carbonizações monitoradas com o auxílio dos pares termoeletricos, a média aumentou para 4,35 e 2,00 kg/h, para o esfriamento ocorrendo fora e dentro da unidade isolante, respectivamente. Esse aumento representa um ganho de 117,5 % na produtividade física do sistema. Ferreira (1988) e Trugilho et al. (1989) obtiveram produtividade física média de 2,23 e 2,77 kg/h,

respectivamente. A Figura 7 ilustra o benefício observado na produtividade física, com o esfriamento ocorrendo fora e dentro da unidade isolante.

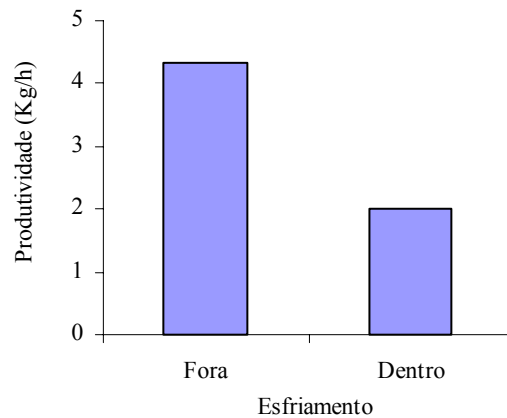


FIGURA 7 Ganho da produtividade em função da forma de esfriamento da unidade de carvoejamento.

## 4.2 Características qualitativas do carvão vegetal

### 4.2.1 Análise química imediata

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios das características químicas determinadas no carvão vegetal produzido nos testes do sistema. Observa-se que os resultados estão de acordo com o normalmente exigido pelas indústrias siderúrgicas, especialmente referentes ao teor de carbono fixo. O teor de carbono fixo médio, considerando somente os testes realizados com os pares termoelétricos, foi de 71,77 %, independentemente da forma de esfriamento da unidade de carvoejamento. Esse teor de carbono fixo indica que a temperatura final de carbonização média ficou em torno de 450 °C. Segundo Jacomino et al. (2002), as indústrias siderúrgicas brasileiras utilizam carvão vegetal com um teor de carbono fixo na faixa de 65 % a 75 %. O teor de carbono fixo e o teor de materiais voláteis não apresentaram diferenças significativas, independente da forma de esfriamento.



Os valores estão, inclusive compatíveis com as análises de carbonizações realizadas em escala de laboratório, utilizando-se forno elétrico (mufla).

O teor de cinzas foi bem inferior ao normalmente encontrado na literatura, podendo ser consequência direta da madeira ou devido a não contaminação do carvão vegetal por terra, o que, normalmente ocorre nos sistemas tradicionais.

TABELA 5 Resultados das análises químicas imediatas realizadas no carvão vegetal.

Testes	UMIDADE (%)	TMV (%)	TCZ (%)	TCF (%)
1*	4,90	24,44	0,17	75,39
2*	4,08	18,49	0,43	80,52
3**	3,51	29,45	0,12	70,00
4**	5,21	26,14	0,22	73,55
<b>Média</b>	<b>4,42</b>	<b>24,63 a</b>	<b>0,23</b>	<b>74,87 a</b>
5***	6,41	26,57	0,11	73,32
6***	6,36	23,45	0,11	76,49
7****	5,64	27,93	0,12	71,95
8****	7,01	26,14	0,22	74,18
9****	4,28	29,17	0,05	70,78
10****	4,89	28,01	0,24	71,75
<b>Média</b>	<b>4,95</b>	<b>26,87a</b>	<b>0,14</b>	<b>73,08 a</b>

\*, \*\* Esfriamento fora da unidade isolante sem e com os pares termoeletricos respectivamente. \*\*\*, \*\*\*\* Esfriamento dentro da unidade isolante sem e com os pares termoeletricos, respectivamente. TMV, TCZ e TCF = teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, respectivamente. Valores seguidos de mesma letra minúscula, na linha e maiúscula, na coluna, não diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

## 4.2.2 Análise física

### 4.2.2.1 Classificação granulométrica

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios obtidos para a classificação granulométrica do carvão vegetal obtido. Pelos resultados, observa-se que a maior parte do carvão vegetal foi classificada como grossa, o que é interessante para o uso industrial. Observa-se que o esfriamento, ocorrendo fora da unidade de carvoejamento, tende a produzir uma menor quantidade de carvão vegetal classificado como grosso, devido, provavelmente, ao choque térmico que ocorre com o carvão.

TABELA 6 Classificação granulométrica do carvão vegetal.

CLASSIFICAÇÃO DO CARVÃO VEGETAL (%)				
Testes	Peneira 38 mm	Peneira 25 mm	Peneira 12 mm	Resíduo (%)
1*	75,14	16,67	4,57	3,61
2*	69,80	20,55	6,04	3,59
3**	71,01	10,01	3,64	15,32
4**	61,68	23,44	4,42	10,44
<b>Média</b>	<b>69,40</b>	<b>17,67</b>	<b>4,67</b>	<b>8,24</b>
5***	72,00	14,48	5,29	8,21
6***	69,80	20,55	6,04	8,02
7****	71,69	16,54	5,94	5,81
8****	64,38	23,87	6,80	4,94
9****	70,79	16,11	2,33	3,00
10****	85,30	11,68	1,95	1,05
<b>Média</b>	<b>72,26</b>	<b>17,20</b>	<b>4,72</b>	<b>5,17</b>

\*, \*\* Esfriamento fora da unidade isolante sem e com os pares termoeletricos, respectivamente. \*\*\*, \*\*\*\* Esfriamento dentro da unidade isolante sem e com os pares termoeletricos, respectivamente.

#### **4.2.2.2 Densidade relativa aparente e teste de tamboramento**

Os valores obtidos para estas características são apresentados na Tabela 7. Verifica-se que as estimativas de densidade relativa aparente do carvão vegetal não apresentaram diferença significativa em função do método de determinação utilizado, indicando a confiabilidade nos mesmos. No carvão vegetal, a densidade é uma propriedade bastante importante, pois ocupa melhor o volume pelo termorreduzidor nos autoforos. A densidade relativa aparente do carvão varia de acordo com a densidade básica da madeira e com a temperatura final de carbonização (Trugilho et al., 2005 e Brito et al., 1984). Os valores de densidade relativa aparente do carvão vegetal estão compatíveis com os normalmente encontrados na literatura Bastos (1986), Ferreira, (1988), Silva et al. (1994) e Trugilho et al. (1989).

Observa-se, ainda, pelo teste de tamboramento, que o esfriamento fora da unidade isolante tende a produzir um carvão vegetal ligeiramente mais friável, provavelmente, devido ao choque térmico que o mesmo sofre nessa condição. Os valores obtidos para esta característica não apresentaram diferenças significativas independente da forma de esfriamento. Os valores do ensaio de tamboramento estão de acordo com os obtidos por Oliveira et al. (1982).

TABELA 7 Resultado da densidade relativa aparente (DRA) e testes de tamboramento realizado no carvão vegetal.

Testes	DRA (%)			Tamboramento (%)
	Método 1	Método 2	Método 3	
1*	0,393	0,399	0,385	16,98
2*	0,387	0,396	0,402	13,03
5**	0,448	0,397	0,458	17,79
6**	0,428	0,461	0,415	13,03
<b>Média</b>	<b>0,414 aA</b>	<b>0,413 aA</b>	<b>0,415 aA</b>	<b>15,20 aA</b>
3***	0,336	0,368	0,380	13,01
4***	0,342	0,423	0,462	13,61
7****	0,397	0,451	0,454	13,20
8****	0,431	0,463	0,470	12,04
9****	0,435	0,503	0,501	17,98
10****	0,365	0,384	0,375	9,51
<b>Média</b>	<b>0,384 aA</b>	<b>0,432 aA</b>	<b>0,440 aA</b>	<b>13,22 aA</b>

\*, \*\* Esfriamento fora da unidade isolante sem e com os pares termoeletricos, respectivamente. \*\*\*, \*\*\*\* Esfriamento dentro da unidade isolante sem e com os pares termoeletricos, respectivamente. Valores seguidos de mesma letra minúscula, na linha e maiúscula, na coluna, não diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

### 4.3 Perfil térmico observado do forno

Na Figura 8, é mostrado o perfil térmico apresentado pelo sistema, em que A e B encontram-se ilustrados os esfriamentos fora e dentro da unidade isolante, respectivamente. Observa-se que ocorre uma queda intensa da temperatura de carbonização na condição de esfriamento fora da unidade de isolamento o que era esperado. Verifica-se, ainda, que as temperaturas nos diferentes pares termoeletricos não se distanciaram muito, indicando o bom manejo da câmara de combustão externa.

Nas Figuras 9, 10 e 11 mostra-se o perfil térmico médio obtido pelos valores dos pares termoeletricos 1, 2 e 4 (média interna 1), dos pares termoeletricos 1, 2, 3, 4 e 5 (média interna 2) e pela chaminé. Observa-se que em nenhum dos testes, a queima de madeira na câmara externa foi suficiente para atingir uma temperatura média interna de 300 °C. Verifica-se, ainda, que as temperaturas médias não foram discrepantes usando-se a média interna 1 e 2 em todos os testes, indicando um controle adequado do aquecimento do sistema.

Pelas Figuras 9, 10 e 11 foi possível estabelecer a relação funcional entre a temperatura média interna de carbonização e a temperatura média dos gases eliminados pela chaminé. A importância de se estimar a temperatura média interna de carbonização, por meio da temperatura média dos gases eliminados pela chaminé, está no fato de poder controlar melhor a combustão interna e, conseqüentemente, a temperatura e a velocidade da carbonização, possibilitando trabalhar com maior eficiência em determinadas faixas de temperatura.

Nas Tabelas 8 e 9 apresentam-se as equações de regressão ajustadas para se estimar a temperatura interna de carbonização, em função da temperatura dos gases eliminados pela chaminé. Observa-se que os modelos apresentaram elevados coeficientes de determinação corrigidos, porém, o modelo logarítmico apresentou um melhor ajuste e um menor coeficiente de variação. Trugilho et al. (1989) encontrou um modelo quadrático, o qual se ajustou bem ao fenômeno.

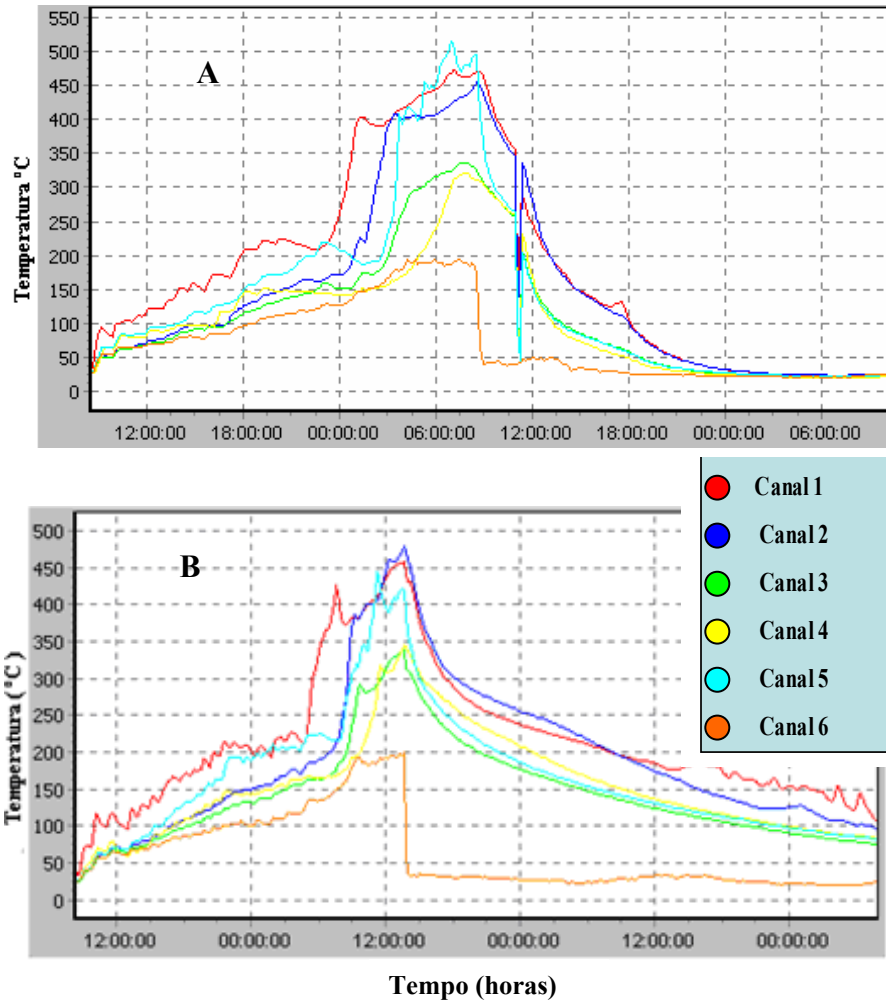


FIGURA 8 Perfil térmico obtido pelos termopares, (A) esfriamento fora e (B) esfriamento dentro da unidade isolante.

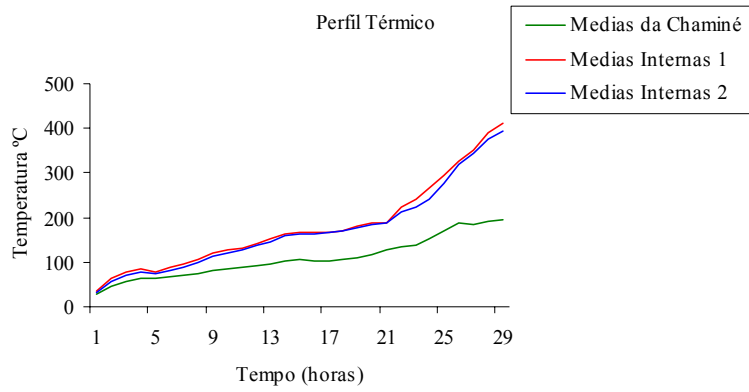
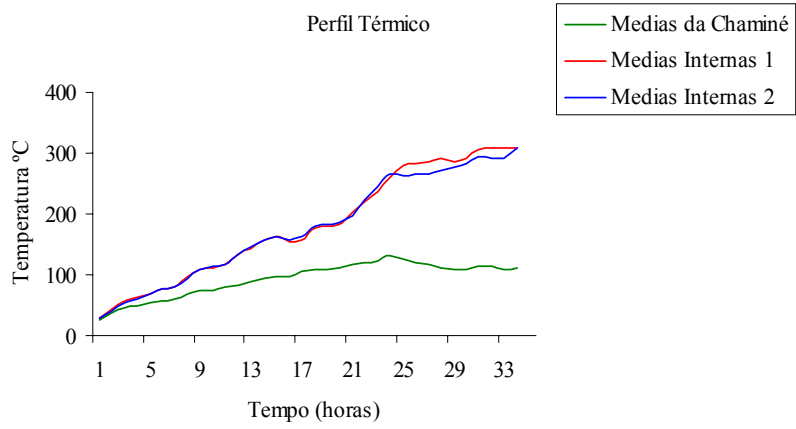


FIGURA 9 Perfil térmico médio para os testes 3 e 4.

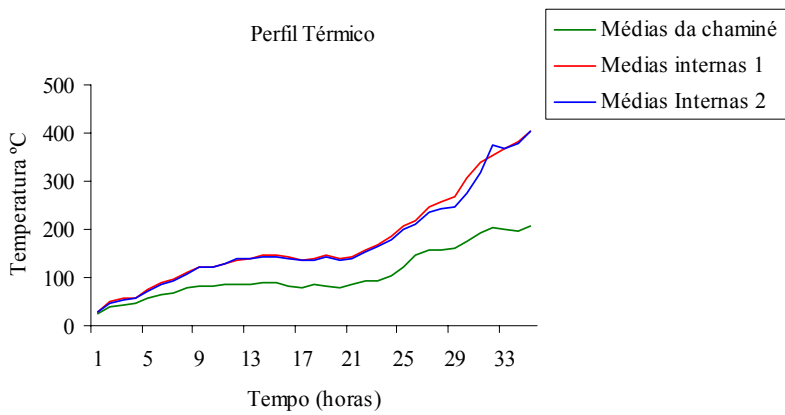
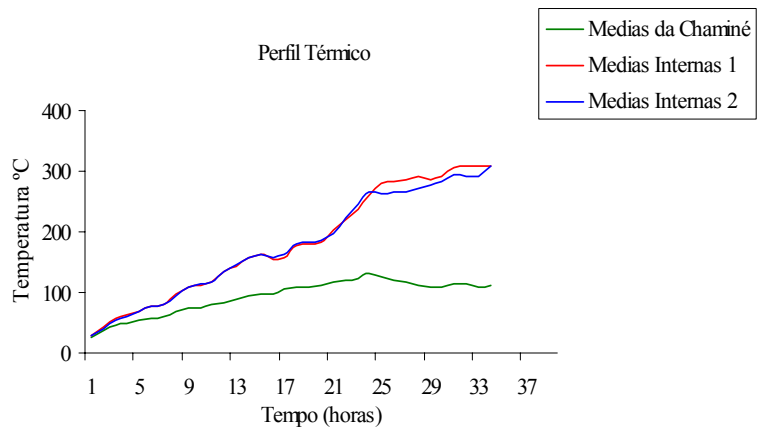


FIGURA10 Perfil térmico para os testes 7 e 8.



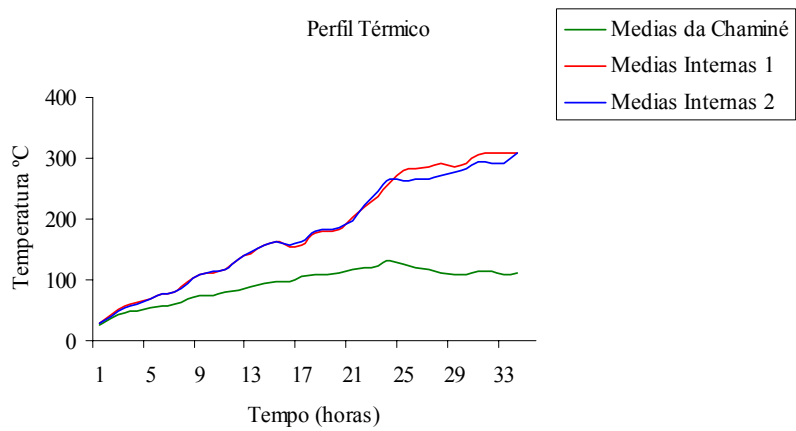
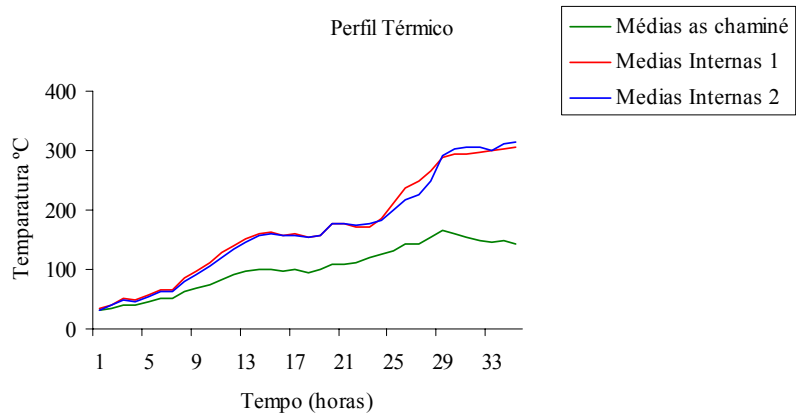


FIGURA 11 Perfil térmico médio para os testes 9 e 10.

TABELA 8 Relação funcional entre a temperatura média interna 1 de carbonização e temperatura média dos gases eliminados pela chaminé.

Equações						
Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\bar{r}^2$	CV
Linear	-24,2875	2,02366			0,782**	24,12
Cúbico	-46,4998	2,62238	0,00460000	0,0000103912	0,783**	24,09
Logarítmico	0,501914797	1,26444			0,869**	4,13

Média 1: Temperatura média do forno referente aos canais 1, 2 e 4.

\*\* : Significativo, a 1% de probabilidade.

TABELA 9 Relação funcional entre a temperatura média interna 2 de carbonização e a temperatura média dos gases eliminados pela chaminé.

Equações						
Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\bar{r}^2$	CV
Linear	-26,6044	1,98792	-	-	0,796**	22,68
Cúbico	-59,5611	3,03413	0,00963154	0,0000264291	0,797**	22,64
Logarítmico	0,455032063	1,27834	-	-	0,876**	4,05

Média 2: Temperatura Média do forno referente aos canais 1, 2, 3, 4 e 5.

\*\* : significativo, a 1% de probabilidade

## 5 CONCLUSÕES

Com base na interpretação dos resultados obtidos no sistema de carbonização de madeira, pôde-se concluir que:

a) o tempo de carbonização e o rendimento em carvão vegetal não sofreram interferência da umidade da madeira;

b) a unidade de carvoejamento (metálica) exerce papel decisivo na etapa de secagem da madeira enforada;

b) o tempo de carbonização e o rendimento em carvão vegetal, o teor de carbono fixo e o material volátil não foram afetados significativamente pela forma de esfriamento;

c) o tempo médio de esfriamento determinado com o auxílio dos pares termoeletricos foi 10 e 38 horas para a condição fora e dentro da unidade isolante, respectivamente;

d) observou-se uma redução de 73,33% no tempo de esfriamento, quando a unidade de carvoejamento esfriava fora da unidade isolante;

e) o tempo de esfriamento médio, sem o uso dos pares termoeletricos para a condição fora da unidade isolante, foi bem menor do que o realizado dentro da mesma unidade, indicando uma redução de 56,16 % no tempo de esfriamento;

f) o teor de carbono fixo médio, considerando somente os testes realizados com os pares termoelétricos, foi de 71,77%, independentemente da forma de esfriamento;

g) o teor de cinzas observado no carvão vegetal foi bem menor do que o esperado;

h) os valores de densidade relativa aparente não sofreram grande variação de acordo com os métodos de determinação utilizados;

i) o esfriamento fora da unidade isolante tende a produzir um carvão vegetal ligeiramente mais friável;

j) o modelo logarítmico foi o que apresentou o melhor ajuste e menor coeficiente de variação, sendo considerado o mais adequado para estimar a temperatura média interna de carbonização em função da temperatura média dos gases eliminados pela chaminé.

## RECOMENDAÇÕES

1) Melhorar as condições de trabalho dos carvoeiros, tendo em vista a possibilidade de recuperação e queima dos gases gerados pelo processo de carbonização da madeira.

2) Possibilitar o carregamento e descarregamento mecânico do forno.

3) Reduzir o desperdício de energia com a utilização de materiais considerados resíduos na câmara de combustão.

4) Adotar técnicas de recuperação dos produtos líquidos gerados pela carbonização ou a utilização da sua energia no próprio sistema.

5) Controle das emissões de gases poluentes, com a instalação de dispositivos separadores de particulados.

6) Adotar tecnologias nas quais os gases quentes gerados da carbonização possam ser utilizados no processo de secagem da próxima carga a ser carbonizada.

7) Estudar a influência da umidade na carbonização no processo desenvolvido (consumo de lenha x condução de calor).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. M. de. **Efeito da temperatura sobre rendimento e propriedades dos produtos da carbonização de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden.** 1983. 40 p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. A. **O Processo de carbonização contínua da madeira:** produção e utilização do carvão vegetal. Belo Horizonte, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC, 1982. p. 143-156.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **Normas técnicas NBR 8633.** Brasília, 1983. n. p.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS. Disponível em: < <http://www.silviminas.com.br/>> . Acesso em: 15 dez. 2006.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS. Disponível em: < <http://www.silviminas.com.br/>> . Acesso em: 23 fev. 2007.

BASTOS, J. G. F. **Desenvolvimento e teste de um forno metálico para carbonização de madeira.** 1986. 37 p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional:** resultados preliminares ano/base 2005. BRASÍLIA-DF, 2006.

BRITO, J. O. de.; BARRICHELLO, L. E. G.; COUTO, H. T. Z. de.; MENDES, C. J.; REZENDE, G. C. de. Estudo do comportamento de madeira de eucalipto frente ao processo de destilação seca. **Boletim Técnico Florestal**, Brasília, v. 8, p. 5-36, 1984.

CALLE, F. R.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira.** Campinas, SP. UNICAMP, 2005.

FERREIRA, L. M. H. C. da. **Desenvolvimento de uma retorta para carbonização de madeira**. 1988. 48 p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

JACOMINO, V. M. F.; CASTRO, L. F. A. de.; RIBEIRO, E. D. L.; LEÃO, M. M. D.; SOUZA, C. M. de; GOMES, A. M.; ALMEIDA, M. L. B.; LOPES, L. E. F.; **Controle Ambiental das Indústrias de Produção de Ferro-Gusa em Altos-Fornos a Carvão Vegetal**. Belo Horizonte, 2002. 302 p.

LÚCIO, Á. V.; SIDNEY, P. D. A.; PIDNER, H. Forno de carbonização Contínua em Módulos Horizontais. In: SEMINÁRIO INTERNO VALLOUREC E MANNESMANN, 2000, Tubes, Paraopeba, MG. **Melhoria Contínua da Carbonização da Madeira**. Tubes, Paraopeba, MG, 2000. p. 19-20.

MEDEIROS, C. A.; REZENDE, M. E. A. Alcatrão vegetal: perspectivas de produção e utilização. **Revista da Fundação João Pinheiro**, Belo Horizonte, v. 13, n. 9/12), p. 42-48, set. /dez. 1983.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: **Produção e utilização do carvão vegetal**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais- CETEC, 1982. p. 75-89.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2003. 199 p

OLIVEIRA, E. de. **Correlações entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de Eucalyptus grandis (W. Hill ex-Maiden)**. 1988. 47 p. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Caracterização e otimização do processo de fabricação de carvão vegetal em fornos de alvenaria. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS/CETEC. **Carvão vegetal: destilação, carvoejamento,**

propriedades, controle de qualidade. 1982. p. 62-102. (Série de Publicações Técnicas).

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C. **Curso de atualização em carvão vegetal**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa/Centro produções Técnicas – CPT, 2000. 76 p.

PINHEIRO, P. C. C. da; VIANA, E.; REZENDE, M. E. A. de.; SAMPAIO, R. S. **A produção de Carvão vegetal**. Belo Horizonte, MG, 2006. 103 p.

SILVA, J. R. M. da.; VALENTE, O. F.; VITAL, B.; LELLES, J. G. Desenvolvimento de um forno de carbonização com cúpula metálica móvel. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 20, n. 4, p. 507-513, out. /dez. 1996.

SCHOUT, C.; GARDEL, D. Forno de Carbonização Continua em Módulos Horizontais. In: SEMINÁRIO INTERNO VALLOUREC & MANNESMAN TUBES, 2000, Paraopeba, MG. **Melhoria contínua de carbonização da madeira**. Paraopeba, MG, 2000.

TRUGILHO, P. F.; REGAZZI, A. J.; VALENTE, O. F.; VITAL, B. R. **Relação funcional entre a temperatura média interna de um forno de carbonização e a temperatura dos gases da chaminé**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1988. p. 17-20.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A. M.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **CERNE**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, abr. /jun. 2005.

TRUGILHO, P. F.; VALENTE, O. F.; VITAL, B. R.; REGAZZI, A. J. Influência do tempo de funcionamento de câmara de combustão de forno de alvenaria no rendimento da carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 13, n. 2, p. 195-202, jul. /dez. 1989.

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



VALENTE, A. F.; LELLES, J. G. Carbonização da Madeira de Eucalyptus. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 141, p. 74-79, set. 1986.