

DANIEL CAMARA BARCELLOS

FORNO CONTAINER PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL:  
DESEMPENHO, PERFIL TÉRMICO E CONTROLE DA POLUIÇÃO

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  
2002

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

T

B242f  
2002

Barcellos, Daniel Camara, 1976 –  
Forno container para produção de carvão vegetal:  
desempenho, perfil térmico e controle da poluição \ Daniel  
Camara Barcellos. - Viçosa : UFV, 2002.  
72p. : il.

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

1. Carvão vegetal – Produção. 2. Forno container. 3.  
Madeira – Carbonização. 4. Fornalha celular. 5. Poluição –  
Controle. 6. Biomassa Florestal. 7. Energia Florestal. I.  
Universidade Federal de Viçosa. II. Título.


CDO adapt. CDD 634.986732

DANIEL CAMARA BARCELLOS


FORNO CONTAINER PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL:  
DESEMPENHO, PERFIL TÉRMICO E CONTROLE DA POLUIÇÃO

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”.

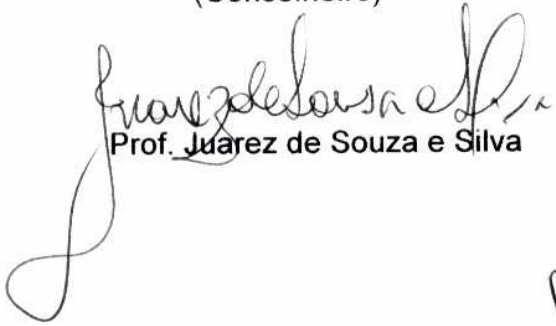
APROVADA: 01 de abril de 2002



Prof. Benedito Rocha Vital  
(Conselheiro)



Prof. Ricardo Marius Della Lucia  
(Conselheiro)



Prof. Juarez de Souza e Silva



Engª Ana Márcia M. Carvalho



Prof. Alexandre Santos Pimenta  
(Orientador)

À minha família e  
À todos que amo.

## AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela formação científica.

Ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café – CBP&D – Café pelo financiamento do projeto.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e o CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico) pela concessão de bolsas de mestrado e desenvolvimento tecnológico industrial respectivamente.

Ao Professor Juarez de Souza Silva, pelo grande apoio dado ao projeto.

Ao professor Alexandre Santos Pimenta pela orientação e apoio dado no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Benedito Rocha Vital e Ricardo Marius Della Lucia pelos conselhos e orientações.

Aos demais componentes da banca examinadora, pelas sugestões apresentadas.

Aos formandos em Engenharia Florestal Carlos Afonso de Souza e Rosalvo Maciel Guimarães Neto, que colaboraram nos seus estágio na preparação e execução do experimento.

Ao Engenheiro Florestal Clodoaldo Cajado Barnabé pela colaboração

nas análises de qualidade do carvão do experimento.

Aos funcionários do setor de armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola José Raimundo Domingos e Antonio Pedro Machado.

Aos funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, José Aristeu da Silva e José Cardoso da Silva.

## BIOGRAFIA

DANIEL CAMARA BARCELLOS, filho de Paulo Sérgio Alves Barcellos e Ilma Camara Barcellos, nasceu em 24 de setembro de 1976, na cidade de Niterói, Rio de Janeiro.

Em março de 1999, concluiu o curso de Engenharia florestal pela Universidade Federal de Viçosa.

Em fevereiro de 2000, concluiu o curso de Especialização em Fontes Alternativas de Energia pela Universidade Federal de Lavras.

Em março de 2000, iniciou o curso de Mestrado em Ciência Florestal, na área de concentração tecnologia da madeira, na Universidade Federal de Viçosa.

## CONTEÚDO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. O carvão como fonte energética.....	4
2.2. Sistemas de carbonização.....	8
2.2.1. Fornos de alvenaria.....	8
2.2.2. Outros fornos.....	9
2.2.3. Forno container.....	10
2.2.3.1. Histórico do forno container.....	10
2.2.3.2. Operação do forno container.....	13
2.3. O processo de carbonização.....	14
2.4. Aspectos ambientais do carvoejamento.....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1. Container metálico.....	18
3.2. A base e poço isolante.....	18
3.2.1. Fornalha celular.....	20
3.2.2. Determinação da curva do ventilador.....	21
3.3. Avaliação da madeira.....	24
3.3.1. Determinação da densidade e umidade.....	24
3.3.2. Determinação do diâmetro da lenha.....	25
3.3.3. Determinação do poder calorífico.....	25
3.4. Avaliação do processo de carbonização.....	26
3.4.1. Medição da temperatura.....	26
3.4.2. Determinação do perfil térmico.....	27
3.5. Avaliação da qualidade do carvão.....	27
3.5.1. Amostragem do carvão.....	27
3.5.2. Determinação da densidade e porosidade do carvão.....	28
3.5.2.1. Densidade aparente.....	28



3.5.2.2. Densidade verdadeira.....	29
3.5.2.3. Porosidade.....	30
3.5.3. Análise química imediata.....	30
3.5.3.1. Determinação do teor de umidade.....	30
3.5.3.2. Determinação do teor de matérias voláteis.....	31
3.5.3.3. Determinação do teor de cinzas.....	32
3.5.3.4. Determinação do teor de carbono fixo.....	32
3.5.4. Determinação do poder calorífico.....	33
3.5.4.1. Poder calorífico superior.....	33
3.6. Determinação do balanço de massa e energia do sistema.....	33
3.7. Comparação econômica.....	34
3.7.1. Tempo de retorno do capital investido ou “pay back” (T).....	34
3.7.2. Razão receita/custo (R).....	34
3.7.3. Razão receita média/custo (Rm).....	35
3.7.4. Valor presente líquido (VPL).....	35
3.7.5. Taxa interna de retorno (TIR).....	36
3.7.6. Razão benefício-custo (R(i)).....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
4.1. As carbonizações preliminares.....	38
4.2. Evolução da temperatura.....	39
4.2.1. Correlação entre os termopares.....	40
4.3. Perfil térmico do forno durante a carbonização.....	42
4.4. Ajuste de equação: evolução da temperatura média.....	43
4.5. Resultados médios.....	47
4.6. Matriz de correlação.....	51
4.7. A fornalha celular.....	53
4.8. Balanço de massa e energia.....	56
4.9. Avaliação econômica (avaliação de projetos).....	57
4.10. Forno container x sistemas tradicionais.....	61
4.11. Propostas para os próximos projetos.....	63
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	65
6. SUGESTÕES.....	67
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

## RESUMO

BARCELLOS, Daniel Camara, M. S., Universidade Federal de Viçosa, Abril de 2002. **Forno *container* para produção de carvão vegetal: desempenho, perfil térmico e controle da poluição.** Orientador: Alexandre Santos Pimenta. Conselheiros: Benedito Rocha Vital e Ricardo Marius Della Lúcia.

Para o experimento foi desenvolvido e avaliado um forno de ciclo semi-contínuo para produção de carvão vegetal com capacidade para 1,5 st de lenha em conjunto com uma fornalha celular aquecedora de grãos que foi utilizada para queima dos gases poluentes. Foram inseridos termopares no conjunto forno-fornalha com o objetivo de se estabelecer um perfil térmico do sistema. A taxa média de aquecimento do forno *container* foi de 47 °C/h atingindo uma temperatura final média de carbonização de 432 °C em aproximadamente 9,2 horas. A espécie de madeira utilizada foi o *Eucalyptus sp.* com umidade em base seca média de 41% e densidade básica de 0,5 g/cm<sup>3</sup>. A maioria das variáveis que avaliam a qualidade do carvão foram bastante similares aos dos sistemas de carbonização utilizados tradicionalmente, no entanto foi verificado baixo teor de cinzas do carvão, inferior a 1%, e uma elevada porosidade do carvão, superior a 75%. O rendimento gravimétrico em carvão situou-se entre 28 e 38%. A eliminação dos gases da carbonização por meio de sua queima na fornalha foi eficiente, e a

temperatura média de saída dos gases após sua queima foi de 630 °C, superior à de alguns queimadores utilizados comercialmente, indicando a eficiência da fornalha, além da possibilidade de gerar quantidade considerável de energia passível de ser aproveitada para outros fins.

## ABSTRACT

BARCELLOS, Daniel Camara , M. S. Universidade Federal de Viçosa, April, 2002. **Carbonization container kiln for charcoal production: performance, thermal profile and pollution control.** Adviser: Alexandre Santos Pimenta. Committee Members: Benedito Rocha Vital and Ricardo Marius Della Lucia.

A carbonization container kiln for charcoal production with a firewood capacity of 1,5 st together with a cellular furnace for grain heating which was used for burning pollutant gases was developed and evaluated. Thermal pairs were inserted in the combined oven-furnace with the objective of establishing the thermal profile of the system. The carbonization container average heating rate was 47 °C/h reaching a final average temperature of 432 °C in approximately 9,2 hours. The firewood used was *Eucaliptus sp.* having a humidity average on dry base of 41% , and a basic density of 0,5 g/cm<sup>3</sup>. Most variables that evaluated the firewood quality were similar to the ones which are obtained in the carbonization systems traditionally used. However, a low charcoal ashes content, inferior to 1%, and an elevated charcoal porosity, superior to 75% were verified. The gravimetric yield in charcoal was placed between 28 and 38%. The elimination of gases from the carbonization through their burning in the furnace was efficient, and the gases outlet average

temperature after their burning was 630 °C superior to some burners used commercially indicating great efficiency of the furnace besides the possibility of generating considerable energy that could be used for other purposes.

## 1. INTRODUÇÃO

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

O carvão vegetal é uma fonte energética de grande importância no Brasil, não só pelo fato de ser uma fonte renovável, mas também pela sua importância histórica e econômica no país. O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, uma vez que  $\frac{1}{4}$  da produção mundial é proveniente do Brasil. Este insumo energético é em grande parte utilizado pelo setor industrial brasileiro, principalmente o segmento siderúrgico (ABRACAVE, 2001), sendo o estado de Minas Gerais o maior consumidor e produtor nacional (PINHEIRO & SAMPAIO, 2001).

O carvão possui duas funções no processo siderúrgico: ser o agente redutor nas reações termoquímicas com o minério de ferro, e o de fornecer energia para liquefazê-lo. Para cada tonelada de aço produzido se consomem 3 metros de carvão vegetal. (COTTA, 1996).

A vantagem de se usar o carvão vegetal em relação à lenha como fonte energética, é a de possuir maiores quantidades de energia por unidade

de massa e a de possuir menor teor de matérias voláteis. A lenha com 30% de umidade apresenta em média 3.000 Kcal/Kg enquanto que o carvão apresenta em média 6.800 Kcal/Kg (BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2001).

No Brasil a produção de carvão vegetal faz uso de fornos de alvenaria rudimentares em que o controle do processo se dá por fatores subjetivos como cor da fumaça e temperatura das paredes ao tato do operador. Segundo VALENTE (1986), há uma discrepância tecnológica, no sentido em que a tecnologia de produção de carvão vegetal, apesar de antiga, evoluiu muito pouco no país, em comparação com o grande avanço alcançado pela produção de gusa.

A conversão da madeira em carvão não é um processo isento de poluição, apesar de ser a madeira uma fonte renovável de energia. PIMENTA et al. (1999) detectaram inúmeros compostos poliaromáticos presentes na fumaça da carbonização que possuem a capacidade de ocasionar toxicidade e mutagenicidade ao ser humano.

Ao considerarmos:

- A forma como carvão é produzido: utilizando fornos de carbonização rudimentares, em que o controle do processo é bastante empírico;
- As condições insalubres das carvoarias: um ambiente de trabalho em que os trabalhadores ficam expostos continuamente à fumaça da carbonização, à temperaturas elevadas e à poeira do carvão ;
- A elevada perda energética dos sistemas atuais: A rusticidade dos fornos dificulta a utilização de sistemas que possam aproveitar esta energia, e:
- A importância econômica e histórica deste setor;

Objetivamos neste estudo projetar, construir e avaliar um sistema de carbonização de ciclo semi-contínuo, que seja técnica e economicamente viável, ecologicamente correto e que seja alternativo aos sistemas utilizados atualmente.

Especificamente os objetivos deste estudo foram de:

- Projetar, construir e avaliar um forno de ciclo semi-contínuo tipo container com capacidade para 1,5 estéreos de lenha, considerando

parâmetros do processo (taxa de aquecimento, temperatura final média e tempo de carbonização) da matéria prima madeira (densidade, umidade e tamanho das peças) e do produto carvão (teor de carbono fixo, matérias voláteis e cinzas, porosidade, densidades aparente e verdadeira, rendimento gravimétrico);

- Estabelecer o perfil térmico do forno;
- Avaliar a eficiência da utilização da fornalha celular para eliminação/redução da poluição;
- Avaliar economicamente o projeto;
- Propor aproveitamento da energia não aproveitada.



## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

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

Carbonização é o processo pelo qual a madeira é submetida a tratamento térmico a temperaturas elevadas, em uma atmosfera redutora controlada (ALMEIDA & REZENDE, 1982).

O carvão pode ser definido como um material sólido, poroso, de fácil combustão e capaz de gerar grandes quantidades de calor (6.800 Kcal/Kg). Pode ser produzido artificialmente, pela pirólise de madeira, produzindo o carvão vegetal; ou originar-se de um longo processo natural, denominado encarbonização, pelo quais substâncias orgânicas, principalmente vegetais, são submetidas à ação da temperatura terrestre durante cerca de 300 milhões de anos e transformam-se em carvão mineral. Em função da natureza desses processos, o carvão vegetal é também chamado de artificial, e o carvão mineral, de natural (BARSA,1998).

O Brasil é o maior produtor de carvão vegetal do mundo, produzindo em 1999, 6,4 milhões de toneladas métricas (26,9 milhões de m<sup>3</sup>), 25% da produção mundial, dos quais 75% oriundos de madeira de reflorestamentos, sendo que o eucalipto é utilizado em 52% das florestas plantadas no Brasil. Oitenta e seis por cento do carvão vegetal produzido é utilizado no setor industrial na produção de ferro-gusa e aço (4,7 Mton), ferro-ligas (0,56 Mton) e cimento (0,24 Mton). O setor residencial consome 9%, e o setor comercial (pizzarias, padarias e churrasarias), 1,5% (PINHEIRO & SAMPAIO, 2001).

O uso de carvão vegetal como redutor do minério de ferro no Brasil data de 1.591 em fundições artesanais para produzir ferramentas de uso agrícola na colônia. (ROCHA et al. 2001). A siderurgia é um setor econômico de importância histórica no Brasil.

O consumo de de carvão vegetal no Brasil é bastante alto superior a 25.000.000 de metros de carvão anuais (Tabela 1).

Tabela 1 - Histórico do consumo de carvão vegetal no Brasil (1.000 mdc)

<b>Ano</b>	<b>Carvão Vegetal (Nativa)</b>	<b>Carvão Vegetal (Reflorestamento)</b>	<b>Total</b>
1990	24.355	12.547	36.902
1991	17.876	13.102	30.978
1992	17.826	11.351	29.177
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

Fonte: ABRACAVE (2001).

Conforme Tabela 2, Minas Gerais é o maior consumidor de carvão vegetal do país produzindo 80% do carvão vegetal nacional, consumindo 84% desse total no setor siderúrgico. Minas Gerais possui hoje o maior parque

siderúrgico a carvão vegetal do mundo. O carvão vegetal viabilizou o estabelecimento do parque siderúrgico mineiro devido ao baixo custo da madeira, baixo custo de mão-de-obra em todas as fases da produção e alta pureza do produto final. Atualmente as pressões ambientais (efeito estufa) tem dado um novo alento e vigor à produção de aços a partir do carvão vegetal (aço verde) (PINHEIRO & SAMPAIO, 2001).

Tabela 2 - Consumo de carvão vegetal por estado

<b>Estado</b>	<b>Ano de 1999 (MDC)</b>	<b>Ano de 2000 (MDC)</b>
Minas Gerais	16.500.000	15.880.000
São Paulo	825.000	800.000
Bahia	902.000	650.000
Rio de Janeiro	781.000	540.000
Espírito Santo	847.000	1.150.000
Paraná	341.000	-
Mato Grosso do Sul	275.000	440.000
Asica (Carajás)	4.400.000	4.000.000
Outros	2.029.000	1.940.000
<b>Total</b>	<b>26.900.000</b>	<b>25.400.000</b>

Fonte: ABRACAVE (2001)

Conforme Tabela 3 o setor carvão vegetal é o maior consumidor em m<sup>3</sup> de madeira oriunda de reflorestamento, e representa quase 30% do consumo total de madeira industrial no Brasil, e é o segundo setor em consumo total de madeira em m<sup>3</sup> (incluindo madeira proveniente de florestas nativas).

A Tabela 3 indica ainda que o setor à carvão vegetal ainda faz uso intenso de florestas nativas. Cerca ¼ da produção de carvão é proveniente destas florestas.

Tabela 3 - Consumo de madeira industrial em toras no Brasil no ano de 2000 (1.000m<sup>3</sup>)

<i><b>Produto</b></i>	<i><b>Nativas</b></i>	<i><b>Plantadas</b></i>	<i><b>Total</b></i>
<b>Carvão Vegetal</b>	<b>11.800</b>	<b>33.400</b>	<b>45.200</b>
Celulose e Papel	-	32.000	32.000
Lenha Industrial	16.000	13.000	29.000
Serrados	34.000	15.100	49.100
Lâminas e Compensados	2.050	3.960	6.010
Painéis Reconstituídos*	-	5.000	5.000
<b>Total</b>	<b>63.850</b>	<b>102.460</b>	<b>166.310</b>

\* Inclue: aglomerados, chapas de fibra e MDF

Fonte: SBS (2001).

O setor siderúrgico é um importante setor da economia nacional. São quase 100.000 empregos diretos conforme Tabela 4. Se considerarmos ainda que para cada emprego direto estamos gerando 2 empregos indiretos, estaremos falando de quase 300.000 empregos.

Tabela 4 - Mão-de-obra empregada na siderurgia a carvão vegetal no Brasil

<b>Setores de geração de empregos</b>	<b>1999</b>
Reflorestamento (implantação, manutenção florestal)	20.400
Carvão Origem Nativa (colheita, fabricação e transporte)	17.700
Carvão Origem Reflorestamento (colheita, fabricação e transporte)	39.200
Ferro-Gusa (empregos diretos nas usinas)	12.650
Ferro-Ligas (empregos diretos nas usinas)	6.500
<b>Total</b>	<b>96.540</b>

Fonte: ABRACAVE (2001).

## **2.2. Sistemas de carbonização**

Os sistemas de fabricação de carvão vegetal utilizados são na maioria dos casos bastante rudimentares. A maior parte do carvão produzido no Brasil é proveniente de fornos de alvenaria, nos quais não há controle da temperatura de carbonização nem a recuperação dos produtos voláteis que são lançados na atmosfera. (ALMEIDA 1982; VELLA, 1989).

Em alguns países da América Latina como a Nicarágua, bem como algumas regiões do Brasil, o sistema dominante de carbonização são os fornos de terra, que pode ser considerado como o sistema mais empírico de carbonização. O rendimento em carvão é baixo em relação aos sistemas tradicionais além de apresentar um carvão de baixa qualidade misturado com terra e outros materiais. Eles estão inclusos no grupo de fornos que utilizam fonte interna de calor chamados de medas ou caieira , assim como os de alvenaria e os metálicos tipo MARK (BASTOS FILHO, 1988).

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

### **2.2.1. Fornos de alvenaria**

Segundo FERREIRA (2000), o modelo mais simples de forno de alvenaria é o forno tipo rabo quente que consiste de uma construção na forma de colméia, com orifícios de entrada de ar. O carregamento é feito por batelada, sendo a madeira cortada em toras de 1,0 a 2,0 m de comprimento, de acordo com as dimensões do forno. A madeira é pré-secada ao ar até atingir umidade inferior à 30%. O controle da entrada de ar é efetuado pela

obturação progressiva dos orifícios. O avanço do processo de carbonização é avaliado pela coloração da fumaça que escapa pelos orifícios. O processo de carbonização completo, do carregamento do forno à retirada do carvão, dura cerca de 8 dias.

Outros fornos de alvenaria, como os fornos de encosta e os de superfície com e sem câmara de combustão, são fornos semelhantes ao forno do tipo rabo quente e possuem o mesmo o mesmo ciclo de produção. (MARRI et al., 1982)

### **2.2.2. Outros fornos**

Existem outros fornos que são utilizados no Brasil que são objetos de estudos, são eles:

1. **Fornos retangulares da Vallourec & Mannesman** – São fornos de grande capacidade volumétrica (200 st), construídos para permitirem carga e descarga mecanizada. Possuem o mesmo princípio dos fornos de superfície, porém, devido ao seu grande tamanho, a cinética de carbonização é bastante irregular dentro do forno. Atualmente o controle da carbonização desses fornos é realizado pela leitura da temperatura em vários pontos utilizando um aparelho de infravermelho. Possuem sistema de recuperação de alcatrão. O tempo de residência da madeira no forno é da ordem 12 a 15 dias (RAAD, 2000).
2. **Fornos de carbonização contínua em módulos horizontais** – Conforme LÚCIO et. al. (2000) este modelo de forno consiste em diversos reatores interligados entre si por um sistemas de válvulas, que permitem o fluxo dos gases pelos reatores, secando a madeira carbonizando e resfriando. Permite a utilização de qualquer tamanho de madeira.
3. **Fornos de carbonização contínua em módulos verticais** – Este forno consiste em dois reatores verticais sendo um deles em aço inoxidável, com capacidade para 1.250 ton./mês, sendo que no primeiro, a madeira em comprimentos de no máximo 30 cm, é secada e no segundo, carbonizada. Segundo SCHOUT & GARDEL (2000), a

qualidade do carvão obtida com este sistema é a descrita abaixo:

Carbono Fixo:	85 % a 93 %
Poder calorífico	8.100 Kcal a 8.300 Kcal
Voláteis	8-9 %
Cinzas	Até 2 %
Umidade	1 a 5 %

### **2.2.3. Forno container**

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

#### **2.2.3.1. Histórico do forno container**

O forno container foi desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira no Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa no final dos anos 80, resultando em uma em tese de mestrado realizada por FERREIRA (1988).

A primeira unidade construída consistia de um container cilíndrico metálico de 100 cm de altura x por 64 cm de diâmetro. Possuía um poço isolante construído em tijolos, um sistema com talha para içamento e retirada do container. O tempo de carbonização médio foi de 9 horas e 20 minutos com rendimento gravimétrico de 35% (FERREIRA, 1988).

Outros trabalhos sobre o processo de carbonização foram realizados por BASTOS FILHO (1988), TRUGILHO (1988) e de SILVA (1994) que construiu um forno retangular que fazia uso de uma cúpula metálica móvel e possuía um ciclo de carbonização e esfriamento de aproximadamente 48 horas.

O primeiro forno container se encontra até hoje em funcionamento no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira e pode ser visto na figura 1.



Figura 1 - Primeiro forno container desenvolvido. (SILVA, 1988 -Laboratório de Painéis e Energia da Madeira da Universidade Federal de Viçosa - Viçosa - MG)

Durante os anos 90, pouco se estudou o forno container, apesar de esta tecnologia se mostrar promissora. Somente no final dos anos noventa, os estudos sobre o forno container foram retomados com intensidade.

No início dos anos 2000, em um programa de cooperação internacional entre o ministério das relações exteriores do Brasil com o governo da Nicarágua uma unidade do forno container foi implementada neste país. A tecnologia do forno container foi rapidamente assimilada pelos produtores de carvão e já existem hoje inúmeras unidades funcionando e outras em implantação. Uma foto no momento da retirada do container após sua carbonização no modelo de forno implantado na Nicarágua pode ser vista na Figura 2.





Figura 2 - Retirada do container após carbonização (cidade de Diriamba - Nicarágua)

Com o objetivo de ampliar os estudos sobre o forno container, construiu-se no ano de 2001 um protótipo na empresa Vallourec & Mannesman do Brasil na cidade de Paraopeba – MG. Este forno sofreu modificações em seu projeto original, sendo inclusive ampliado para uso em maior escala. Foi o início de estudos mais profundos a respeito desta tecnologia. A Figura 3 ilustra a descarga de carvão do protótipo construído na V & M do Brasil.



Figura 3 -Descarga do carvão do forno container (instalado na V & M do Brasil, localizado na cidade de Paraopeba)

### ***2.2.3.2. Operação do forno container***

Inicialmente o caminhão de lenha é descarregado. A descarga de lenha pode ser feita diretamente dentro do container, o que elimina uma etapa no processo produtivo.

Após a carga de lenha no container, a sua tampa é colocada vedando-o. O container é então levantado por uma talha e levado até o poço isolante que tem a função de conservar o calor do meio, enquanto a decomposição térmica da madeira se processa. O poço possui uma câmara de combustão na base onde são queimados resíduos ou lenha de baixa qualidade, gerando-se calor necessário à carbonização da lenha enforada. Os gases quentes gerados na câmara de combustão atingem o interior do container através dos furos existentes na chapa metálica da sua base e aquecem a carga provocando a sua decomposição térmica. A combustão de resíduos é feita até

que o processo de carbonização se inicie.

Após um ciclo de 6-12 horas a carbonização termina, o container com o carvão quente é retirado e colocado sobre uma caixa de areia onde se resfria por aproximadamente 12 horas. Após o resfriamento o container pode ser aberto sendo basculado para o descarregamento.

Após a retirada do container, um segundo container pode ser colocado no poço isolante, iniciando-se uma nova carbonização, mantendo-se um ciclo semi-contínuo de produção de carvão vegetal.

### **2.3. O processo de carbonização**

A carbonização pode ser representada de maneira simples como:

**MADEIRA ± CALOR = CARVÃO VEGETAL + VAPORES  
CONDENSÁVEIS + GASES NÃO CONDENSÁVEIS + CALOR**

Conforme MEDEIROS & REZENDE (1983) o processo de carbonização pode ser dividido em quatro fases distintas:

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

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

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

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

### **2.4. Aspectos ambientais do carvoejamento**

Atualmente como a maior parte da lenha utilizada na produção de carvão é proveniente de florestas plantadas e manejadas para esta finalidade, teoricamente o CO<sub>2</sub> proveniente da carbonização não é considerado um causador de problemas ambientais, visto que estudos comprovam que estas florestas manejadas capturam todo o CO<sub>2</sub> emitido pelo processo de carbonização durante os ciclos de corte das mesmas (FERREIRA, 2000).

FERREIRA (2000) quantificou as emissões e fixações de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> no

processo siderúrgico de produção de aço considerando duas rotas: uma utilizando o carvão mineral e outra o carvão vegetal. A rota à carvão mineral emitiu 1,65 t de CO<sub>2</sub> e consumiu 1,54 t de O<sub>2</sub> por tonelada de aço produzido, enquanto que a rota a carvão vegetal consumiu 16,34 t de CO<sub>2</sub> e emitiu 1,54 t de O<sub>2</sub> por tonelada de aço produzido (da plantação do eucalipto até a produção do aço). FERREIRA (2000) avaliou ainda liberação de óxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), encontrando para a rota a carvão mineral a emissão 7 kg de SO<sub>2</sub> por tonelada de aço produzido, emissão praticamente ausente na rota a carvão vegetal. Em resumo, ao se fazer uso de florestas plantadas para se produzir carvão e aço colabora-se para a redução do efeito estufa.

Entretanto, o processo de carbonização não é isento de poluição. Segundo PIMENTA et al. (1999), os poluentes provenientes do processo de carbonização podem ser classificados em 3 grupos principais: materiais particulados, gases não condensáveis e os compostos orgânicos condensáveis. O material particulado compõem-se de cinzas, partículas de carvão, fuligem arrastadas do leito de carbonização dentro de microgotículas de alcatrão. Os gases não condensáveis, por sua vez, se compõem essencialmente de CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, enquanto que os compostos orgânicos condensáveis são um grupo formado por compostos orgânicos agrupados em classes químicas variadas.

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

PIMENTA et al. (1999) quantificou hidrocarbonetos policíclicos aromáticos isolados a partir do licor pirolenhoso de *Eucalyptus grandis* e encontraram 14 dos 16 hidrocarbonetos policíclicos aromáticos incluídos na lista de poluentes prioritários da Agência Americana de Proteção Ambiental. Estes compostos, quando ministrados em ratos e cobaias de laboratório por

ingestão, inalação ou por injeção via muscular, intravenosa ou subcutânea induzem o aparecimento de diversos tipo de câncer.

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

Tabela 5 - Desempenho de um incinerador das emissões da carbonização

<b>Ponto de prova</b>	<b>Antes do incinerador</b>	<b>Depois do incinerador</b>
Concentração de poluentes (mg/Nm <sup>3</sup> )	50.000	2
Saída de gases (Nm <sup>3</sup> )	550	5.700
Temperatura média (°C)	90	430
Conteúdo de CO (% gases)	3	--
Conteúdo de CO <sub>2</sub> (% gases)	5	6
Conteúdo de O <sub>2</sub> (% gases)	15	15
Conteúdo de NO <sub>x</sub> (ppm)	--	40 - 55
Conteúdo total de hidrocarbonetos (ppm)	12.000	20 - 30

Fonte: MEZERETTE & GIRARD s.d.

Os resultados mostrados na Tabela 5 demonstram a alta eficiência da incineração dos gases da carbonização, além disso, uma quantidade substancial de energia utilizável é produzida. Outro fator muito importante é que com a instalação de sistemas de queima da fumaça, as condições de trabalho nas plantas de carbonização serão consideravelmente melhoradas. Os níveis de poluição são reduzidos a menos de 0,005 %. Os hidrocarbonetos são reduzidos a 0,25 % da sua quantidade original presentes antes da queima da fumaça.

Além da eliminação da poluição há a energia proveniente da queima que pode ser aproveitada, agregando valor ao produto principal que é o carvão.



### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O forno construído para o experimento consistiu das seguintes partes: container metálico, poço isolante, sistema de movimentação e descarga, sistema de exaustão de gases, fornalha para queima da fumaça. A Figura 4 mostra uma foto geral do equipamento.

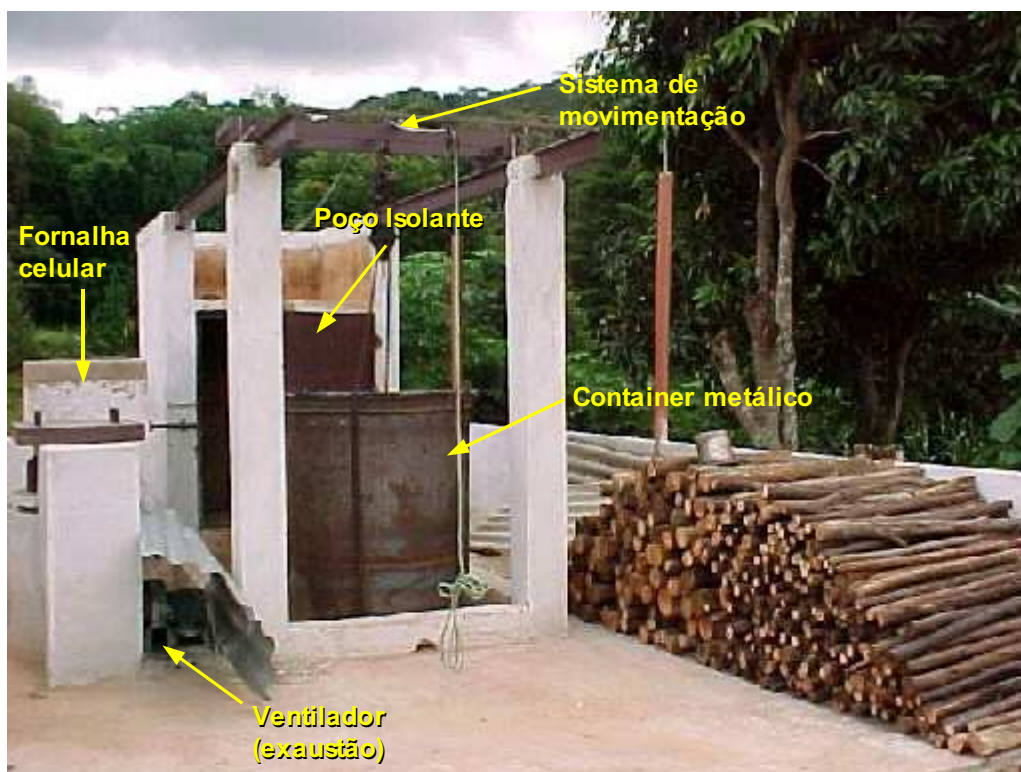


Figura 4 - Vista geral do container

### 3.1. Container metálico

O container metálico consistiu em um cilindro com 1,27 m de diâmetro por 1,50 m de altura, perfazendo um volume nominal de 1,9 m<sup>3</sup>. Foi fabricado com chapa metálica (preta) com espessura de 3 mm para parede e 6 mm para a tampa e fundo do cilindro. A chapa metálica do fundo foi perfurada e os orifícios tinham em média 40 mm de diâmetro distribuídos em toda área da chapa. O fundo do container tinha ainda uma chaminé central de 15 cm de altura por 25 cm de diâmetro, por onde se fazia a retirada dos gases, durante o processo de carbonização.

Nas paredes laterais foram fixados há 25, 75 e 125 cm de altura, 3 tubos metálicos que permitiram a introdução de termopares até o centro do container. A Figura 5 esquematiza um corte lateral do container e uma vista da chapa do fundo.

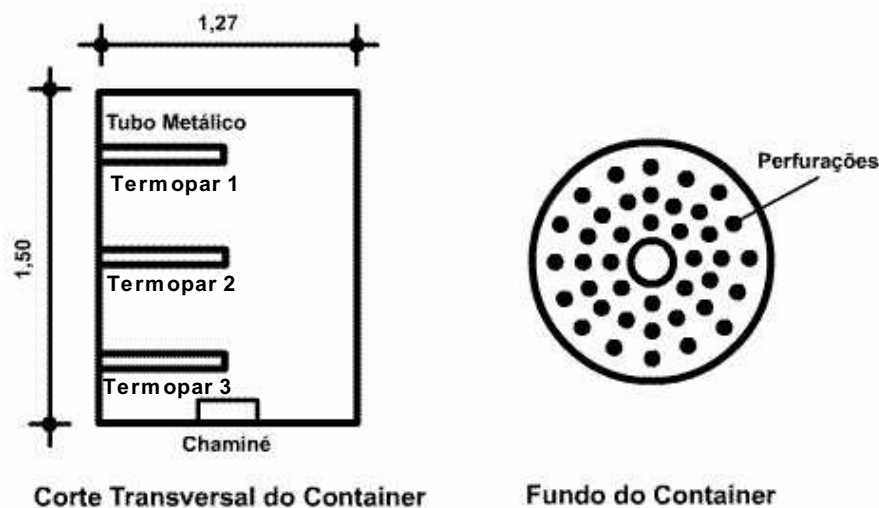


Figura 5 – Corte lateral e vista superior do fundo do container metálico

### 3.2. A base e poço isolante

A base do forno media 2,00 x 2,00 x 0,50 m. Em uma face estava a saída da chaminé e, na sua face oposta, a câmara de combustão (Figura 6). Foi construída com tijolos comuns e argamassa.

A chaminé, também esquematizada na Figura 6, foi construída com

tijolos refratários, massa refratária e argamassa comum, e possuía uma seção transversal de  $600 \text{ cm}^2$ , que foi superestimada com objetivo de evitar seu entupimento por alcatrão, fato verificado em experiências anteriores.

A câmara de combustão, localizada na base do forno (Figura 6) foi construída em alvenaria com as dimensões de  $50 \times 50 \times 30 \text{ cm}$ . Dispunha de uma porta metálica com uma janela regulável localizada na parte inferior, que permitia o controle da entrada de oxigênio. A câmara dispunha ainda de uma grelha construída em barras metálicas de  $25 \text{ mm}$  para a queima do combustível (lenha, tiço, casca etc.), no início do processo de carbonização.

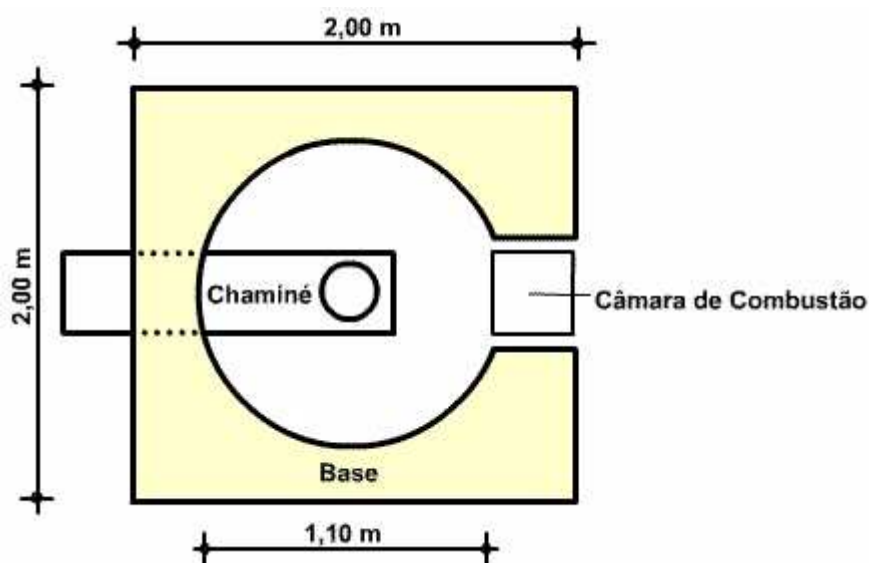


Figura 6 – Vista superior da base do forno

O poço isolante, que se encontrava apoiado sobre a base do forno, foi construído com tijolos comuns, argila, cimento, ferragens e areia com as seguintes dimensões internas:  $1,60 \times 1,60 \times 1,80 \text{ m}$ . O poço possuía uma porta de dupla camada metálica de  $5 \text{ cm}$  de espessura preenchida com lã de vidro. A retirada do container era feita pela porta do poço isolante após um pequeno içamento do container, utilizando uma talha manual com capacidade para duas toneladas. Uma vista do poço isolante é mostrada na Figura 7.



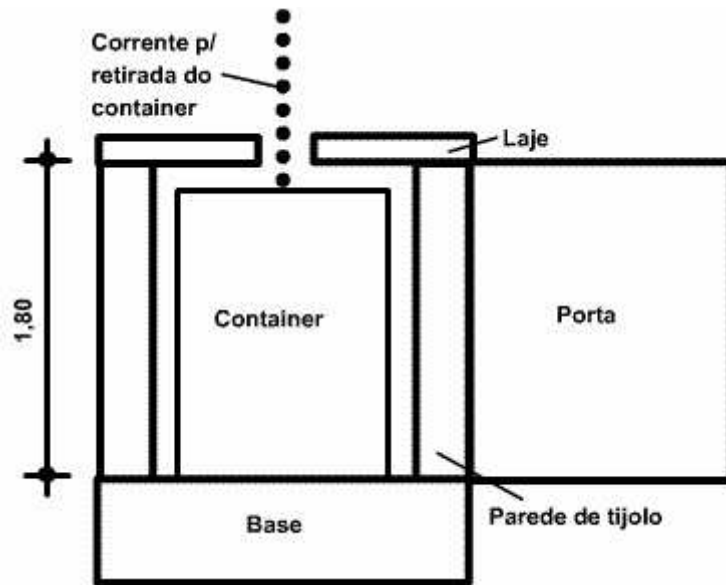


Figura 7- Vista frontal do poço isolante

### 3.2.1. Fornalha celular

A fornalha utilizada para queima dos gases foi construída baseada em uma fornalha utilizada para aquecimento direto de grãos desenvolvida no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Foi construída utilizando-se tijolos comuns e refratários, areia lavada, terra, melaço de açúcar, brita, cimento, ferragens e chapas metálicas.

A célula de queima (Figura 8) com dimensões de 20 x 20 x 20 cm foi construída com vergalhões de 20 mm de diâmetro. Localizava-se no centro da câmara de combustão (volume útil de 0,1 m<sup>3</sup>) que foi revestida no seu interior com tijolo refratário. Acima da célula de queima tinha-se o depósito de biomassa, que abastecia a célula de queima por gravidade à medida que o combustível era queimado. A fornalha possuía ainda um cinzeiro abaixo da célula de queima, para retirada das cinzas, um ciclone para o resfriamento dos gases, e um ventilador centrífugo para succionamento do ar ou gases da carbonização.

A fornalha usualmente utiliza o carvão vegetal como combustível, em granulometria média de 30 cm<sup>3</sup>, podendo-se utilizar outros materiais desde que

se mantenha esta granulometria (SILVA et al., 2000). Em testes preliminares, foram avaliados outros combustíveis como lenha picada e casca que foram consumidos na fornalha sem qualquer inconveniente.

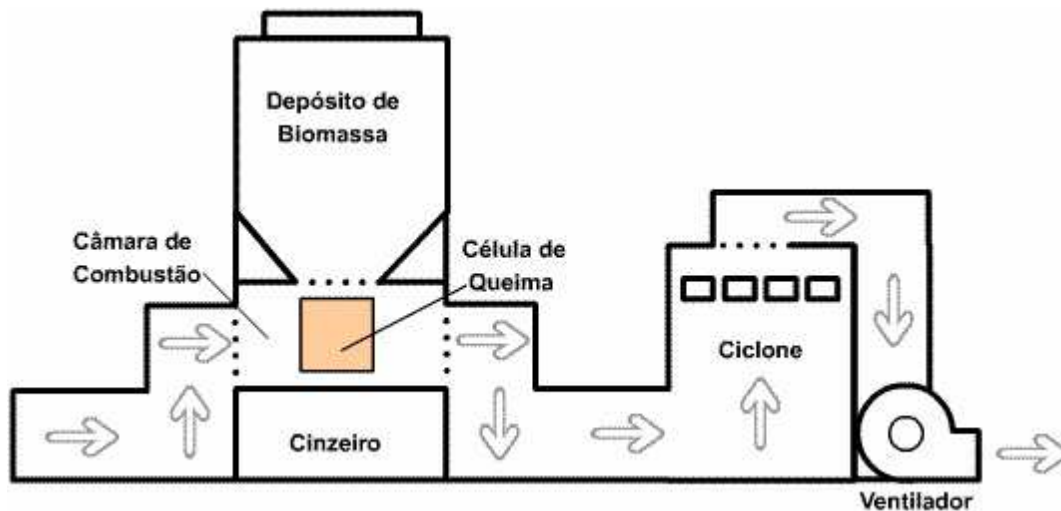


Figura 8 - Esquema da fornalha celular com seu fluxo de gases

### **3.2.2. Determinação da curva do ventilador**

Para determinação da curva do ventilador foi empregada a mesma metodologia utilizada por SILVA (1998) que fez uso da norma da NATIONAL ASSOCIATION OF FAN MANUFACTURES – NAFM (1952). O princípio consiste em utilizar um tubo de Pitot conectado a um manômetro inclinado, para medições total e dinâmica.

Para determinação da curva característica do ventilador é necessário se conhecer a vazão ( $m^3/s$ ) e a pressão estática (mmca).

As leituras de pressões total e estática foram realizadas em intervalos regulares de 2 cm de abertura do cone em 20 posições na seção transversal do tubo conforme Figura 9.

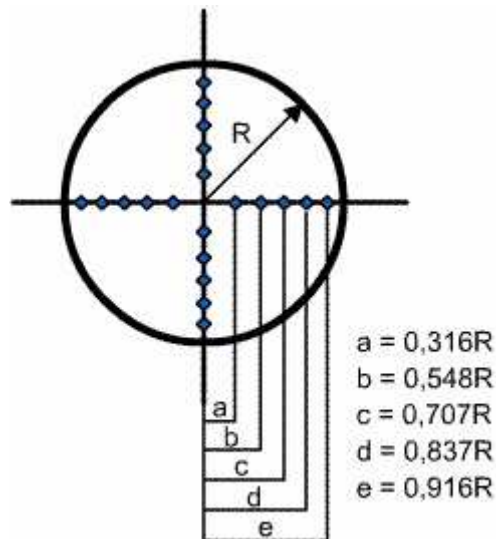


Figura 9 - Distâncias radiais dos diversos pontos para determinação das velocidades pontuais

A montagem do teste com o tubo de Pitot para determinação da pressão dinâmica foi esquematizada conforme Figura 10.

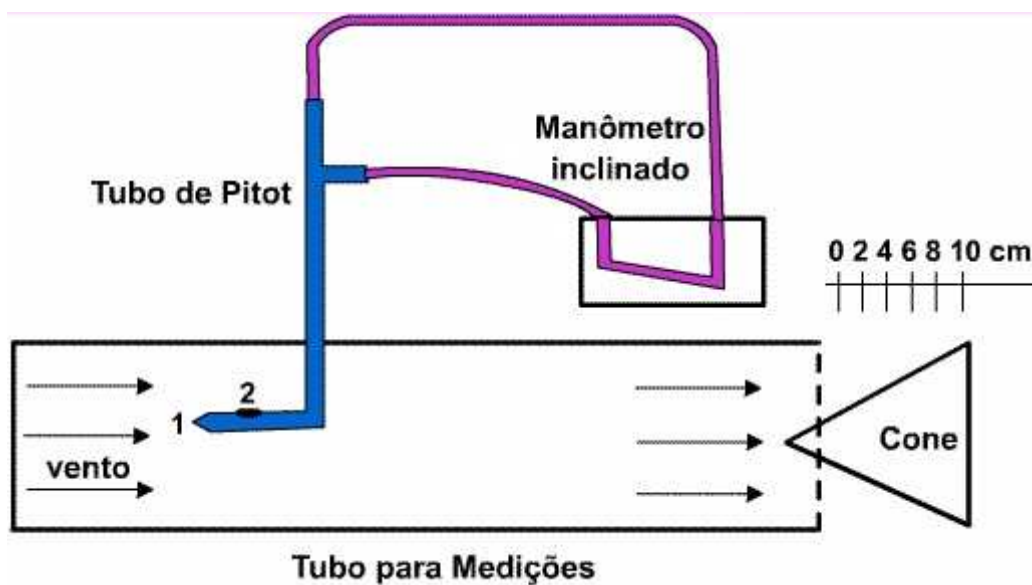


Figura 10 - Montagem para medição da pressão dinâmica com tubo de Pitot e manômetro inclinado

A vazão foi calculada pela média das vazões obtida dos 20 pontos de leitura esquematizados na Figura 9. A Equação 1 foi usada para o cálculo da vazão.

$$V = V_c \cdot \pi \cdot R^2 \quad \text{Equação 1}$$

sendo que

V = Vazão em m<sup>3</sup>/s;

V<sub>c</sub> = Velocidade do gás no duto;

R = Raio da seção transversal do tubo em m.

$$V_c = 4,04 \cdot (P_d)^{0,5} \quad \text{Equação 2}$$

sendo que

V<sub>c</sub> = Velocidade do gás no duto;

P<sub>d</sub> = Pressão dinâmica em mmca.

$$P_d = P_t - P_e \quad \text{Equação 3}$$

sendo que

P<sub>d</sub> = Pressão dinâmica em mmca;

P<sub>t</sub> = Pressão total em mmca;

P<sub>e</sub> = Pressão estática em mmca.

Os dados foram plotados e a equação da curva foi ajustada como pode ser visto na figura 11.

O motor utilizado para movimentar o ventilador possuía tensão de 216 V e corrente de 5 A.

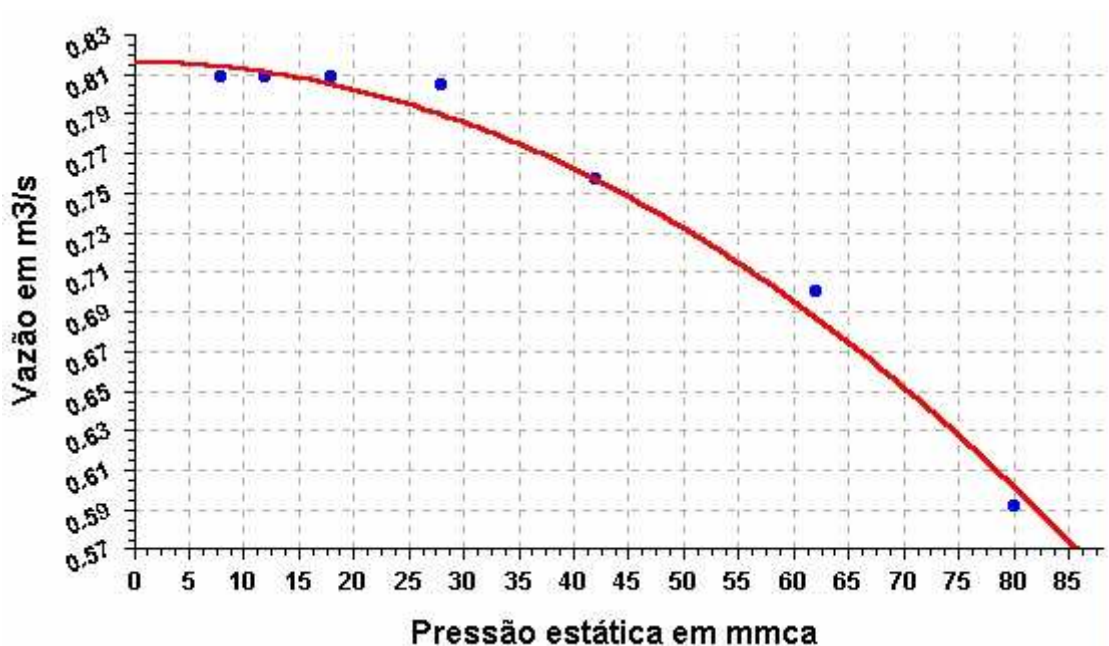


Figura 11 - Curva característica do ventilador utilizado para o funcionamento do conjunto forno container e fornalha celular. Equação usada para ajuste da curva:  $Y = 0,8061000 - 0,0000335x^2$   $R = 0,9928$

### 3.3. Avaliação da madeira

A lenha utilizada foi proveniente de plantios da Zona da Mata mineira de plantios de *Eucalyptus sp.*

#### 3.3.1. Determinação da densidade e umidade

Para a determinação da densidade e umidade foram retiradas aleatoriamente 4 toras como amostra de cada carbonização, sendo que de cada tora retirou-se 3 discos de aproximadamente 3 cm de espessura sendo 2 deles a 20 cm das extremidade e 1 no centro da tora. De cada disco foram retiradas peças no formato de cunha, sendo utilizado 2/6 da peça para cálculo da umidade 1/6 da peça para cálculo da densidade, e 3/6 do disco para repetição caso houvesse dúvidas no resultado.

Para a determinação da umidade, os discos foram pesados úmidos em balança de precisão de 0,01g e levados em estufa à  $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  para secagem durante 24 horas, pesando-os novamente.

A umidade em % foi calculada pela Equação 4:

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

U = Umidade em %;

M<sub>u</sub> = Somatório dos pesos dos discos úmidos, em g;

M<sub>s</sub> = Somatório dos pesos dos discos secos, em g.

Para determinação da densidade (VITAL,1984), as amostras foram saturadas em água sendo determinado o volume de água deslocado das amostras em balança de precisão de 0,01 g. As amostras foram levadas em estufa a 105 °C ± 3 °C para secagem por 24 horas, sendo pesadas secas.

A Equação 5 para determinação da densidade é:

$$D = \frac{PS}{V} \quad \text{Equação 5}$$

PS = Peso seco após a secagem em estufa, em g;

V = Volume de água deslocada, em ml.

### **3.3.2. Determinação do diâmetro da lenha**

Foram estabelecidas duas categorias de diâmetros. Até 10 cm e entre 10 e 20 cm. O comprimento médio das peças foi de 1,40 m, adequado ao tamanho do forno container. As peças de madeira eram dispostas verticalmente a medida que se fazia o carregamento do forno.

### **3.3.3. Determinação do poder calorífico**

A determinação do poder calorífico superior da lenha foi obtido experimentalmente através da bomba calorimétrica adiabática, baseada no princípio de Berthelot, onde a combustão se processa em ambiente fechado, na presença de oxigênio e sob pressão. No caso, o poder calorífico é computado de diferenças de temperatura coletadas antes e após a combustão.

Os passos utilizados para o cálculo do poder calorífico superior foram realizados conforme a norma ASTM D-2015-66

O poder calorífico da madeira na umidade em que foi carbonizado foi calculado pela Equação 6:

$$PCI = PCS - (49,7*U)$$

Equação 6

em que

PCI = Poder calorífico da madeira em que foi carbonizado, Kcal/kg;

PCS = Poder calorífico superior da madeira de eucalipto em Kcal/Kg;

U = Umidade da madeira em %.

### **3.4. Avaliação do processo de carbonização**

#### **3.4.1. Medição da temperatura**

No interior do forno container foram utilizados termopares tipo K (temperaturas até 1.260 °C) de haste longa que eram posicionados no centro do container durante a carbonização nas alturas de 1,25 m (termopar 1), 0,75 m (termopar 2) e 0,25 m (termopar 3). O termopar 4 foi colocado na chaminé do forno a 1,3 metros da saída central dos gases do container.

Na fornalha foram utilizados 3 termopares também tipo K, porém de haste curta, um antes da célula de queima (termopar 5), outro após a célula de queima (termopar 6) e outro depois do ciclone (termopar 7) após o resfriamento do ar.

Os termopares foram conectados a um sistema de aquisição de dados, e os registros de temperatura foram coletados em intervalos regulares de 15 minutos. A Figura 12 ilustra o posicionamento dos termopares na fornalha e forno container.

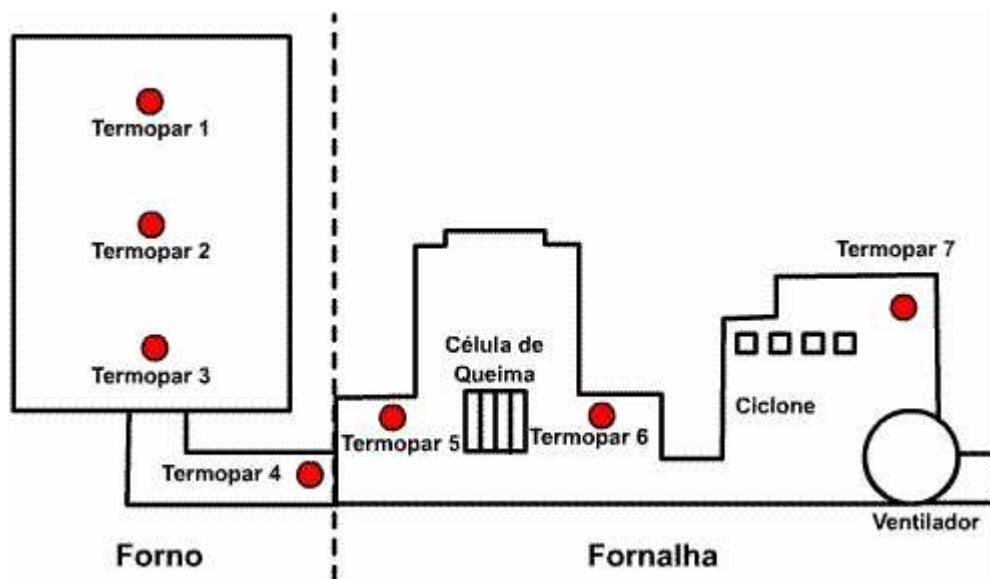


Figura 12- Posicionamento dos termopares no forno e na fornalha

### **3.4.2. Determinação do perfil térmico**

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

## **3.5. Avaliação da qualidade do carvão**

### **3.5.1. Amostragem do carvão**

Os procedimentos para amostragem e preparação da amostra seguiram os procedimentos da ABNT NBR 6923/81. Foram retiradas porções de carvão de diferentes alturas e posições do forno, a medida que o carvão era descarregado, obtendo uma porção representativa do lote, em questão.



### 3.5.2. Determinação da densidade e porosidade do carvão

#### 3.5.2.1. Densidade aparente

Para a determinação da densidade relativa aparente, foi utilizada a norma proposta por OLIVEIRA et. al.(1982c) adaptada do carvão mineral da norma americana ASTM D-167-73. O carvão foi amostrado em granulometria não inferior a 19 mm sendo seco em estufa por  $105 \pm 3$  °C por 2 horas. Utilizou-se um recipiente metálico, com paredes rígidas com 28 cm de diâmetro e 36 cm de altura, com um orifício a 9 cm da borda superior anexado em um tubo de 1,3 cm de diâmetro e 15 cm de comprimento. O recipiente foi preenchido com água juntamente com um cesto cilíndrico de tela fina de arame, de malha de 1 mm, com tampa móvel, com as dimensões de 25 cm de diâmetro e 15 cm de altura, com um peso adicional no fundo. O excesso de água escoou pelo orifício localizado a 9 cm da borda superior, sendo então vedado com uma rolha. Um esquema do procedimento é apresentado na Figura 13.

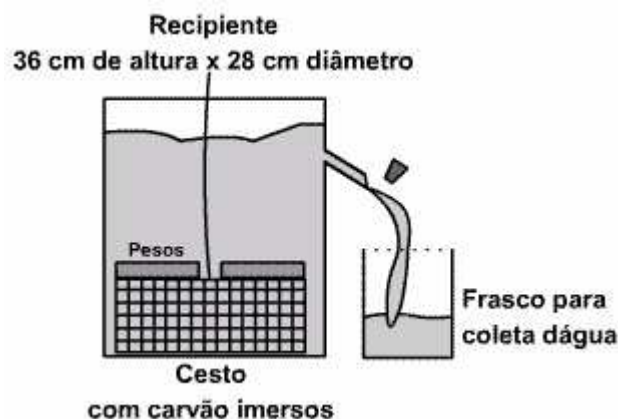


Figura 13- Esquema do método utilizado para determinação da densidade aparente

Foram pesados cerca de 500 gramas de carvão seco de granulometria entre 12 e 19 mm em balança de precisão de 0,1 g, sendo o carvão colocado em um cesto cilíndrico que foi mergulhado no recipiente contendo água destilada ficando imerso por 15 minutos. O orifício do recipiente foi aberto e a água excedente escoou pelo tubo sendo coletada e pesada. Após a coleta da água, levantou-se o cesto e sem retirá-lo do recipiente isolou-o da água por

dois minutos. O carvão umedecido que estava no cesto foi então pesado.

A densidade aparente do carvão foi obtida através da Equação 7:

$$DA = \frac{Pcs}{Pad + (Pcm - Pcs)} \quad \text{Equação 7}$$

em que

DA = densidade aparente, em kg/m<sup>3</sup>;

Pcs = peso do carvão seco em estufa, em g (500 g);

Pad = peso da água deslocada do recipiente pela imersão do carvão, em g;

Pcm = peso do carvão molhado, em g.

### **3.5.2.2. Densidade verdadeira**

A metodologia utilizada para determinação da densidade verdadeira do carvão foi a mesma proposta por OLIVEIRA et. al. (1982c) que consistiu em:

1 - Moer o carvão e depois peneirá-lo em granulometria entre 270 e 325 mesh, sendo seco em estufa por uma hora à temperatura de 105 °C ± 3 °C, deixando-o esfriar em dessecador.

2 - Pesar o picnômetro vazio e colocar aproximadamente 10 gramas de carvão vegetal, adicionando em seguida água destilada em quantidade suficiente para preencher 2/5 da capacidade do picnômetro, fervendo-o durante uma hora em chapa. Após a fervura adicionar água destilada sem no entanto completar o seu volume, esperar esfriar e completar com água destilada até o seu nível de referência. Pesar o conjunto picnômetro + água + carvão, lavar o picnômetro e enchê-lo com água destilada e pesar o conjunto picnômetro + água destilada.

A densidade verdadeira foi calculada pela Equação 8:

$$DV = \frac{Pc}{Pc - (W - W')}$$

Equação 8

em que

DV = Densidade verdadeira do carvão;

Pc = Peso do carvão utilizado, em g;

W = Peso do picnômetro + água + carvão, em g;

W' = Peso do picnômetro + água, em g;

### **3.5.2.3. Porosidade**

A porosidade foi obtida indiretamente conhecendo-se a densidade aparente e a densidade verdadeira do carvão conforme Equação 9.

$$P = 100 - \frac{DA \times 100}{DV}$$

Equação 9

em que

P = Porosidade do carvão em %;

DV = Densidade verdadeira em Kg/m<sup>3</sup>;

DA = Densidade aparente em Kg/m<sup>3</sup>.

### **3.5.3. Análise química imediata**

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

### **3.5.3.1. Determinação do teor de umidade**

O carvão foi amostrado representando o lote em questão (ABNT NBR -6923/81) sendo reduzido à pequenas partículas.

O material particulado foi recolhido e peneirado. Utilizou-se para cálculo da umidade o material que passou na peneira de 40 mesh e ficou retido na peneira de 60 mesh. Pesou-se cerca 1,0 g do carvão amostrado, em balança de precisão de 0,01 g sendo colocado em um cadinho de porcelana seco e tarado. O cadinho com carvão foi levado a estufa previamente aquecida a  $105 \pm 3$  °C, por um período de 2 horas, sendo retirado após este período e levado ao dessecador para resfriamento, sendo finalmente pesado.

O teor de umidade do carvão vegetal em base seca foi calculado de acordo com a Equação 10:

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Equação 10}$$

em que

U = Teor de umidade em base seca, em %;

M<sub>u</sub> = Peso da amostra antes da secagem em estufa, em g;

M<sub>s</sub> = Peso da amostra após secagem em estufa, em g;

OBS: A determinação do teor de umidade foi feita em duplicata e quando os resultados diferiam um do outro em valores relativos mais que 5% a análise era repetida.

### **3.5.3.2. Determinação do teor de matérias voláteis**

O material (particulado e seco na determinação da umidade) foi levado a uma mufla previamente aquecida à  $950 \pm 10$  °C . Primeiro colocou-se o cadinho tampado com o material sobre a porta da mufla deixando-o por 3 minutos e meio, depois colocou-se o cadinho no interior da mufla e fechou-se a porta e deixando-o por 8 minutos. A amostra foi retirada e resfriada em dessecador sendo então pesada

O teor de matérias voláteis do carvão vegetal foi calculado pela Equação 11:

$$MV = \frac{Ms - Mv}{Ms} \times 100$$

Equação 11

MV = Teor de matérias voláteis , em %;

Ms = Massa inicial da amostra seca em estufa, em g;

Mv = Massa final da amostra, em g.

OBS - A determinação do teor de matérias voláteis do carvão foi feita em duplicata e a análise foi repetida quando os resultados diferiram um do outro em valores relativos superiores a 2%.

#### **3.5.3.3. Determinação do teor de cinzas**

O material (particulado e seco na determinação da umidade e na determinação dos voláteis) foi levado a uma mufla previamente aquecida à 600 °C ± 10 °C por um período de 6 horas até a sua completa calcinação. A amostra foi retirada e deixada para esfriar no dessecador sendo então pesada.

O teor de cinzas do carvão vegetal foi obtido pela Equação 12:

$$CZ = \frac{Ms}{Mr} \times 100$$

Equação 12

CZ = Teor de cinzas no carvão, em %;

Mr = Massa do resíduo (cinzas) , em g;

Ms = Massa da amostra seca em estufa, em g.

OBS: A determinação do teor de cinzas do carvão foi feita em duplicata e os resultados quando diferiam um do outro em valores relativos superiores à 10%, repetia-se a análise.

#### **3.5.3.4. Determinação do teor de carbono fixo**

O teor de carbono fixo é uma medida indireta e foi calculado pela Equação 13:

$$CF = 100 - (CZ + MV)$$

Equação 13

em que

CF = Teor de carbono fixo, em %;

CZ = Teor de cinzas no carvão, em %;

MV = Teor de matérias voláteis, em %.

### **3.5.4. Determinação do poder calorífico**

#### **3.5.4.1. Poder calorífico superior**

A determinação do poder calorífico superior da lenha foi obtido experimentalmente através da bomba calorimétrica adiabática, baseada no princípio de Berthelot, onde a combustão se processa em ambiente fechado, na presença de oxigênio e sob pressão. No caso, o poder calorífico é computado pelas diferenças de temperatura coletadas antes e após a combustão. Os passos utilizados para o cálculo do poder calorífico superior foram realizados conforme a norma ASTM D-2015-66:

O poder calorífico na unidade de trabalho foi calculado pela Equação 14 (SILVA, 1988):

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 600 (9 \times \text{H}_2 \times \text{U})$$

Equação 14

em que:

PCI = Poder calorífico do carvão na unidade de trabalho, em Kcal/Kg;

H<sub>2</sub> = Teor de Hidrogênio em Kg H<sub>2</sub>/Kg de combustível = 0,038;

U = Umidade do carvão, Kg H<sub>2</sub>O/Kg de carvão ;

PCS = Poder calorífico superior do carvão em Kcal/Kg.

### **3.6. Determinação do balanço de massa e energia do sistema**

O balanço de massa e energia foi calculado considerando a média das carbonizações efetuadas, para uma tonelada de madeira em base úmida.

O poder calorífico na unidade de trabalho da madeira foi calculado pela Equação 6, e poder calorífico na unidade de trabalho do carvão e do combustível da fornalha foram calculados pela Equação 14.

As variáveis necessárias (umidade e poder calorífico superior) para o

cálculo do poder calorífico na unidade de trabalho foram obtidas das médias das carbonizações que são apresentadas na Tabela 7.

### 3.7. Comparação econômica

Com objetivo de se fazer uma avaliação econômica, foi feito o uso de índices econômicos.

#### 3.7.1. Tempo de retorno do capital investido ou “pay back” (T)

Por este método o projeto que retornar mais rapidamente o capital investido, será o mais viável economicamente (REZENDE e OLIVEIRA, 1993).

O tempo de retorno T foi determinado pela Equação 15.

$$T = \frac{X_0}{R}$$

Equação 15

em que

T = Tempo, em meses ou anos;

X<sub>0</sub> = Custo inicial do projeto, em R\$;

R = Receita por período de tempo, em R\$.

#### 3.7.2. Razão receita/custo (R)

A escolha do projeto é realizada pelo projeto que apresentar maior razão receita/custo (REZENDE e OLIVEIRA, 1993).

A razão receita/custo foi calculada pela Equação 16:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{X_0}$$

Equação 16

em que

R = Razão receita/custo;

$X_0$  = Custo inicial do projeto, em R\$;

$X_j$  = Receitas, em R\$.

### 3.7.3. Razão receita média/custo ( $R_m$ )

A viabilidade do projeto está ligada a uma  $R_m$  positiva, quanto maior a  $R_m$  maior a viabilidade do projeto (REZENDE e OLIVEIRA, 1993).

A razão receita média/custo foi calculada pela Equação 17:

$$R_m = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{\frac{n}{X_0}}$$

Equação 17

em que

$R_m$  = Razão receita média/custo;

$X_0$  = Custo inicial do projeto, em R\$;

$X_j$  = Receitas, em R\$;

$n$  = Vida útil do projeto, em anos.

### 3.7.4. Valor presente líquido (VPL)

A viabilidade econômica de um projeto analisado pelo método do VPL é indicada pela diferença positiva entre receitas e custos, atualizados com determinada taxa de desconto conforme Equação 18 e Equação 19. (REZENDE e OLIVEIRA, 1993).

A característica essencial do método do VPL é o desconto, para o presente de todos os fluxos de caixa esperados como resultado de uma decisão de investimento (REZENDE e OLIVEIRA, 1993).

$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j (1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j (1+i)^{-j}$$

Equação 18

ou



$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j (1 + i)^{-j} - C_0$$

Equação 19

em que

$C_j$  = Custos no final do período de tempo considerado, em anos;

$R_j$  = Receita líquida no final do ano, em R\$;

$C_0$  = Custo inicial do investimento, em R\$;

$i$  = Taxa de desconto.

$n$  = Duração do projeto, em anos.

Para facilitar o entendimento comparamos os projetos forno container e rabo quente considerando produção mensal de 3.000 MDC (produção mensal de grande parte das carvoarias), duração dos projetos iguais (20 anos) e taxas de juros variando entre 2% e 50% (intervalo de juros praticado na maior parte dos países do mundo). O Brasil na presente data apresentava juros anuais de 18,75%.

### 3.7.5. Taxa interna de retorno (TIR)

A TIR é a taxa média de crescimento de um investimento, constituindo uma medida relativa que reflete o aumento no valor do investimento, ao longo do tempo, tendo em vista os recursos requeridos para produzir o fluxo das receitas. (REZENDE e OLIVEIRA, 1993). A TIR deve ser maior que a taxa de juros estipulada como referência. As equações 19 e 20 foram utilizadas para o cálculo da TIR.

$$TIR = \sum_{j=0}^n A_j (1 + i)^{-j} - = 0$$

Equação 20

$$TIR = \sum_{j=0}^n R_j (1 + i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j (1 + i)^{-j} = 0$$

Equação 21

em que

$A_j$  = receita líquida no final do ano  $j$ , sendo  $A_j = R_j - C_j$ ;

$R_j$  = receita no final do ano  $j$ ;

$C_j$  = Custo no final do ano  $j$ ;

$n$  = duração do projeto, em anos.

Como os projetos são mutuamente exclusivos utilizar-se-á a taxa de Fisher (TF) caso o projeto de menor investimento apresente maior TIR.

$$TF = \sum_{j=0}^n (b_j + a_j) (1 + I_{b-a})^j = 0 \quad \text{Equação 22}$$

em que

$a_j$  = fluxo de caixa na época  $j$ , associado ao projeto A;

$b_j$  = fluxo de caixa na época  $j$ , associado ao projeto B;

$I_{b-a}$  = taxa de juros.

### 3.7.6. Razão benefício-custo ( $R_{(i)}$ )

É a relação entre o valor presente dos benefícios e o valor presente dos custos, para dada taxa de desconto. (REZENDE e OLIVEIRA, 1993).

Quanto maior este valor, mais viável é o projeto.

$$R_{(i)} = \frac{VB_{(i)}}{VC_{(i)}} \quad \text{Equação 23}$$

em que

$R_{(i)}$  = razão benefício-custo à taxa de desconto  $i$ ;

$VB_{(i)}$  = valor presente à taxa  $i$  da sequência de benefícios;

$VC_{(i)}$  = valor presente à taxa  $i$  da sucessão de custos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. As carbonizações preliminares

Inicialmente foram feitos testes preliminares com o objetivo de detectar alguns problemas e solucioná-los.

Os problemas encontrados nos testes preliminares foram os seguintes:

1. Não uniformidade da carbonização no container. Verificou-se que a carbonização estava ocorrendo da região mais próxima à câmara de combustão para região mais distante. Este problema ocasionou redução do rendimento em carvão e aumento da quantidade de tiço ao final da carbonização.
2. Produção de tiços no parte inferior do container, em regiões onde a entrada de oxigênio era pequena, principalmente entre a chaminé e o fundo do container.
3. Baixa vazão do ventilador centrífugo. Inicialmente foi utilizado um ventilador centrífugo de 20 m<sup>3</sup>/min. A vazão máxima do ventilador se mostrou insuficiente no funcionamento do conjunto forno-fornalha.
4. Inflamação do gás de carbonização na saída da chaminé, principalmente na fase final da carbonização. A inflamação do gás poderia mascarar a temperatura real do gás de carbonização, objeto estudado neste trabalho.

As soluções para estes problemas foram:

1. Modificação na câmara de combustão objetivando melhor distribuição da energia no forno container.
2. Aumento no consumo de combustível na câmara de combustão no início do processo.
3. Rebaixamento da chaminé de saída no forno de alvenaria de formar a desobstruir a entrada de oxigênio na região onde o fluxo de ar era dificultado.
4. Troca do ventilador centrífugo de 20 m<sup>3</sup>/min por um de 50 m<sup>3</sup>/min.
5. Aumento da altura da chaminé de 5 cm para 15 cm dentro do container impedindo que as áreas de combustão localizadas no fundo do container inflamassem o gás da carbonização antes que o mesmo chegasse à câmara de combustão da fornalha, para ocorrer a queima.

## **4.2. Evolução da temperatura**

Conforme mostra a Figura 14, durante a carbonização foram observados 4 fases distintas:

Primeira fase (00:00-02:00 horas) - Esta fase foi marcada pelo aquecimento da carga de lenha contida no container pela queima de combustível na câmara de combustão do forno. Os três termopares colocados dentro do container indicaram uma taxa de aquecimento muito parecida, apresentando todas temperaturas muito próximas. Foi observado que a temperatura obtida na chaminé do forno foi superior a dos demais termopares, este fato é explicado pelo fato de parte da energia da queima do combustível estava sendo perdida pela exaustão forçada dos gases.

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

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

carbonização.

Quarta fase (a partir de 10:00 horas) - Nesta fase ocorreu a contração do carvão com sua subsequente queima, o que resulta em redução no rendimento. Houve uma leve redução da temperatura média do leito de carbonização com uma pequena tendência a aumento das mesma até temperaturas próximas à temperatura de combustão (800-1200 °C) caso o processo continuasse.

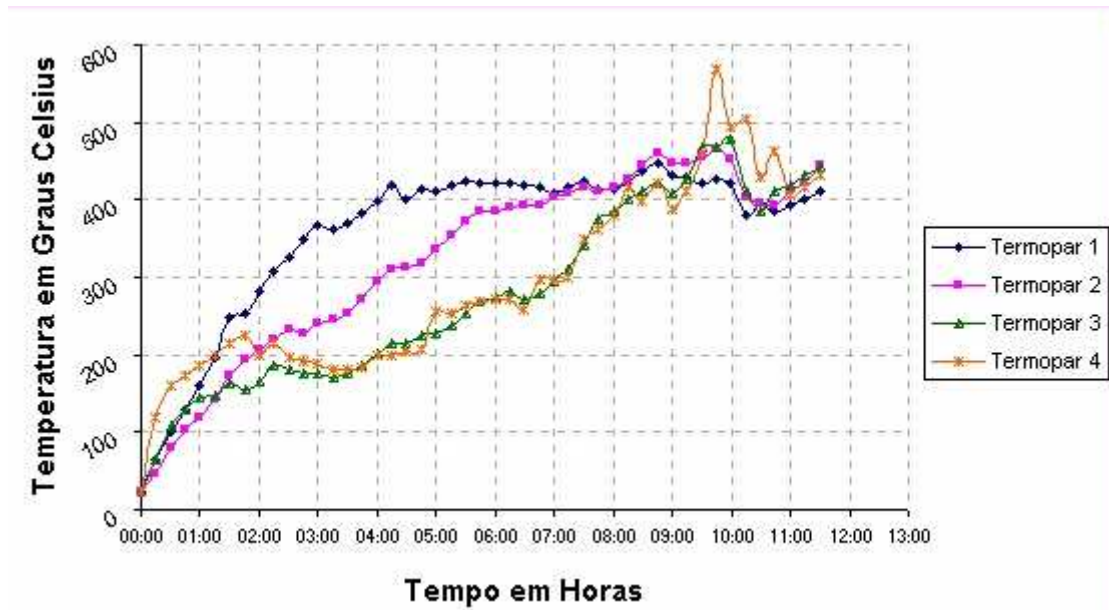


Figura 14 - Comportamento da temperatura nos diferentes termopares ao longo do tempo

#### 4.2.1. Correlação entre os termopares

O objetivo de se fazer uma correlação com os termopares é de a partir de um único termopar monitorarmos e controlarmos a carbonização.

O termopar 4 foi escolhido para ser o o termopar de monitoramento e controle por ser o de mais fácil instalação no forno e por representar bem a temperatura de término da carbonização. Os coeficientes de correlação entre o termopar 4 (chaminé) e os demais termopares é mostrado na Tabela 6.

Observou-se que o termopar 3 é o que indica com maior precisão o momento de término da carbonização pois indica que a frente de carbonização chegou na parte inferior do container (Figura 15). Como o termopar 4

apresentou uma alta correlação com o termopar 3, e por ser de fácil colocação no forno justifica-se a sua escolha.

Se a temperatura no termopar 4 estiver em 470 °C obteremos através da equação da Tabela 6 para o termopar 3 uma temperatura aproximada de 452 °C, que pode vir a ser definida como a temperatura final de trabalho. Porém esta temperatura bem como o tempo de reação à esta temperatura depende de outras variáveis como teor de umidade , densidade e diâmetro da lenha, que precisam ser melhor estudadas, a fim de otimizar o rendimento no processo.

Tabela 6 - Correlação entre o termopar 4 e demais termopares.

<b>Especificação</b>	<b>Termopar 1</b>	<b>Termopar 2</b>	<b>Termopar 3</b>	<b>Média</b>
Coeficiente de Correlação	0,6240	0,8402	0,9695	0,8614
Desvio Padrão	84,1135	67,2915	30,0316	57,0546
Equação	Y = a + bx a = 194,98 b = 0,5575	Y = a + bx a = 70,36 b = 0,8653	Y = a + bx a = -11,16 b = 0,9865	Y = a + bx a = 84,55 b = 0,8035

### 4.3. Perfil térmico do forno durante a carbonização

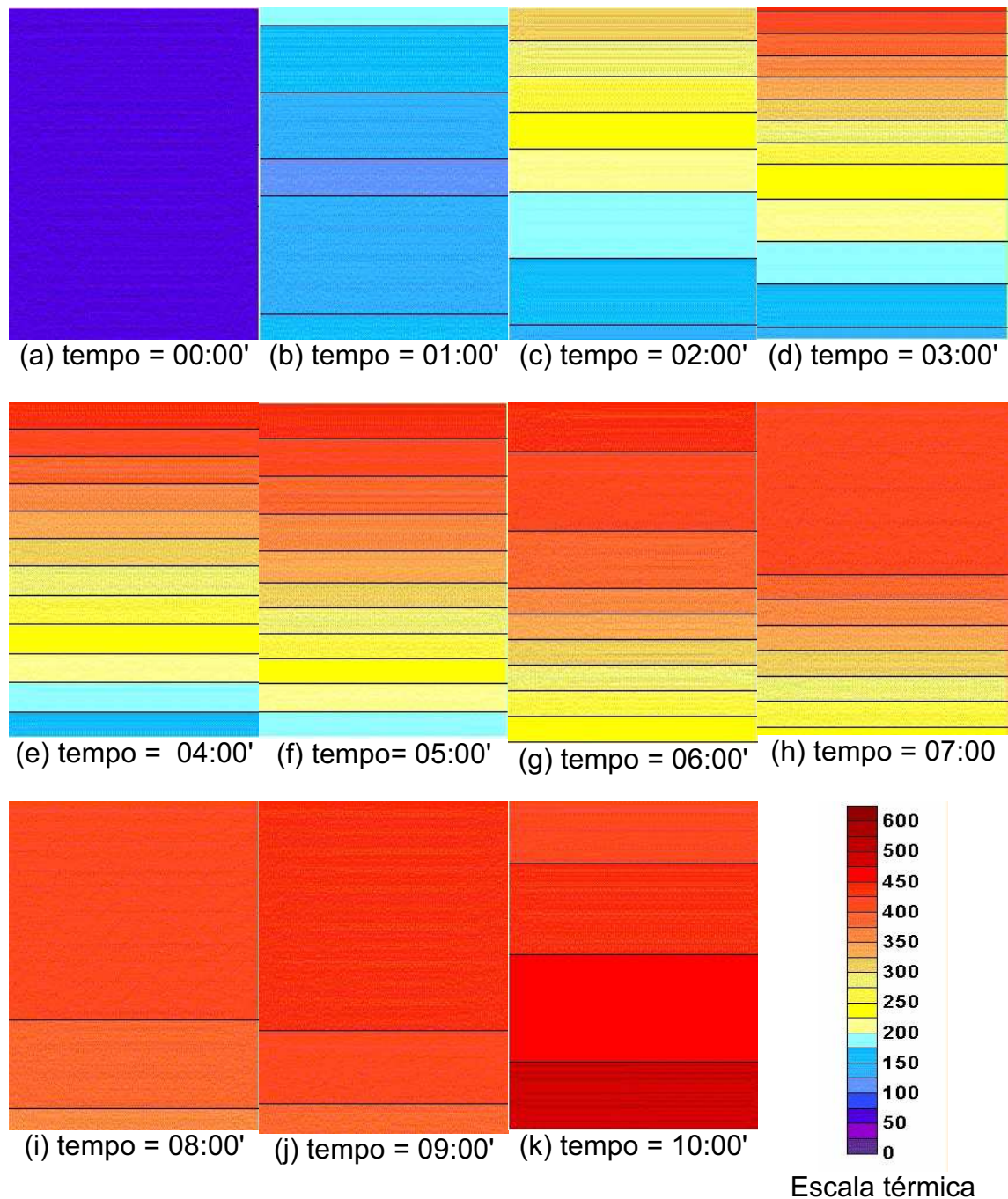


Figura 15 - Representação gráfica do comportamento da temperatura dentro do container ao longo do tempo.

A Figura 15 representa o comportamento da carbonização ao longo do tempo e posição no forno.

No tempo zero (Figura 15a) o forno se encontrava em temperatura ambiente.

Nas duas primeiras horas (Figura 15b e Figura 15c), o container sofria aquecimento proveniente da queima de combustível na câmara de combustão. A partir da segunda hora o sistema entrava em regime exotérmico, não sendo mais necessário a introdução de calor e oxigênio em excesso, em que foi formado um gradiente de temperatura em que tínhamos temperaturas mais elevadas na parte superior do container e temperaturas mais baixas na sua parte inferior. (Figura 15d).

A medida que a carbonização ocorria, os gases quentes subiam e a fumaça descia sendo succionada pela chaminé. Formava-se então uma frente de carbonização na parte superior do container com temperatura próxima dos 400 °C (Figura 15d).

Da quarta até a sétima hora (Figuras 15e à 15h) a frente de carbonização descia, primeiro secando a lenha e depois pirolisando-a.

Na oitava e nona hora (Figuras 15i e 15j) o container apresentava em todas as suas posições temperaturas próximas aos 400 °C, não se evidenciando gradientes de temperatura.

Na décima hora (Figura 15k) ocorria uma inversão do gradiente de temperatura. A parte inferior do container apresentava temperatura mais elevada que a sua parte superior indicando a proximidade do fim da carbonização. Entretanto, o fim da carbonização dependia de outras variáveis, principalmente variáveis da matéria prima, madeira. Carbonizações em que a lenha possuía maior densidade, umidade ou diâmetro necessitavam de um maior tempo de exposição à temperatura final de carbonização (400-500 °C).

#### **4.4. Ajuste de equação: evolução da temperatura média**

O modelo que melhor representou as carbonizações efetuadas foi o modelo sigmoidal apresentado na Equação 24 :

$$y = \frac{ab + cx^d}{b + x^d}$$

Equação 24



sendo,

**y** = Temperatura em graus celsius;

**x** = Tempo em horas;

**a, b, c, d** = coeficientes.

Tal modelo foi escolhido pois:

- Apresentou um bom coeficiente de correlação da temperatura de carbonização ao longo do processo (tempo).
- Resultou em erro padrão pequeno.
- O modelo não permitiu valores no eixo x negativos, (o que coincide com com valor sempre positivo do tempo).
- A temperatura tende a ser crescente com o tempo até temperaturas próximas a da combustão.

Outros modelos foram testados e analisados e observou-se que:

- Modelos lineares como  $\mathbf{a + bx}$  não representavam o comportamento real da carbonização.
- Modelos e associações exponenciais tipo  $\mathbf{y = a(exp^{bx})}$  ou  $\mathbf{y = a(1-exp^{-bx})}$  possuíam como ponto de partida a interseção dos eixos x e y, o que só seria verdade se toda a carbonização iniciasse com a temperatura à zero graus celsius.
- Modelos quadráticos como  $\mathbf{y = a + bx + cx^2}$  apresentavam um bom ajuste, porém permitiam valores negativos no eixo dos x (tempo) o que não era possível e resultavam em valores de y negativos quando aumentávamos (dobrávamos por exemplo) o tempo médio de carbonização.
- Outros modelos sigmoidais como  $\mathbf{y = a/(1+bexp^{-cx})}$  também apresentaram bom ajuste, entretanto o modelo utilizado apresentou maior coeficiente de correlação e menor erro padrão.

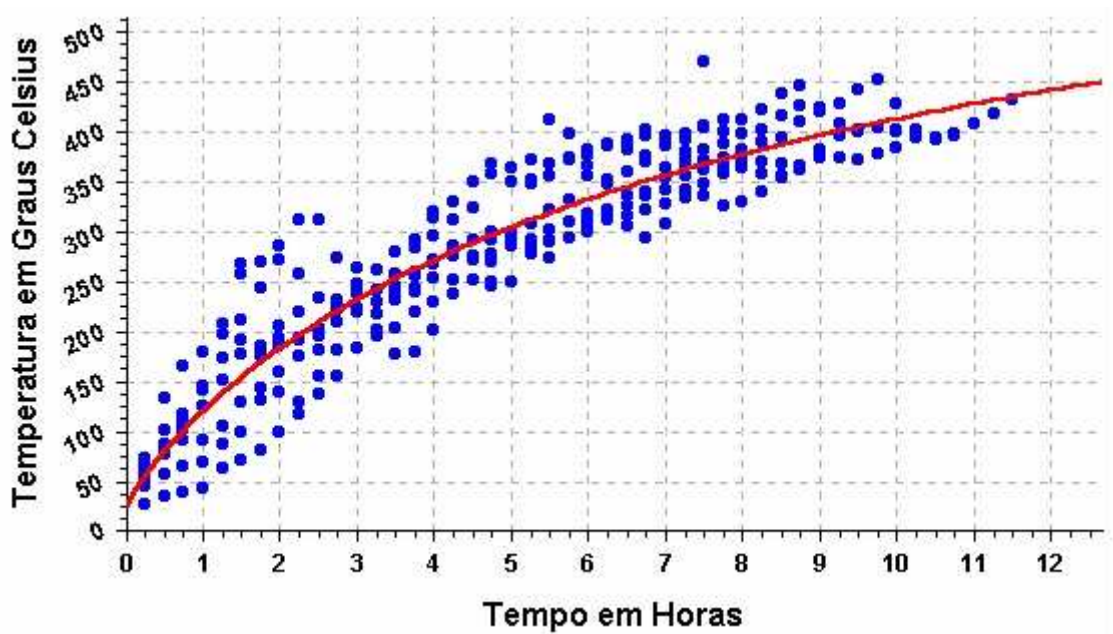


Figura 16 - Evolução da média ponderada dos 3 termopares ao longo do tempo

$$y = \frac{ab + cx^d}{b + x^d}$$

equação 25

Coefficientes

a = 25,59

b = 6,48

c = 741,10

d = 0,8852

Erro padrão: 37,38

Coefficiente de correlação: 0,9431

Um carbonizador pode, a partir desta equação, considerando as condições do experimento (lenha de eucalipto com 41 % ± 8 %, densidade básica de 0,51 g/cm<sup>3</sup> ± 0,03 g/cm<sup>3</sup>, comprimento médio da lenha de 1,4 m e diâmetro médio de 11,41 cm ± 2,68 cm), acompanhar a evolução da

temperatura ao longo do tempo. Se, por exemplo, no tempo de 4 horas e 15 minutos, a temperatura média de carbonização for diferente do intervalo obtido pela equação 25 ( $280\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), é um indício de que a carbonização foi alterada, sendo necessário verificar a causa desta alteração (matéria-prima, equipamento ou processo) e se essa alteração prejudica o produto final (carvão). Caso a resposta seja afirmativa, o carbonizador deve tomar as providências para corrigir ou pelo menos amenizar a causa do problema.

## 4.5. Resultados médios

Tabela 7 – Variáveis médias obtidas de todas as carbonizações com respectivo desvio padrão

<b>Variáveis da madeira</b>	
Espécie	<i>Eucalyptus sp.</i>
Umidade (%)	41,15 ± 8,01
Densidade básica (g/cm <sup>3</sup> )	0,50 ± 0,02
Diâmetro médio (cm)	11,41 ± 2,68
Comprimento médio (m)	1,40 ± 0,10
Poder calorífico superior (Kcal/Kg)	4.334,23 ± 51,78
<b>Variáveis da carbonização</b>	
Tempo total de carbonização (h)	9,20 ± 1,42
Temperatura média final (°C)	431,10 ± 45,18
Taxa média de aquecimento (°C/h)	47,76 ± 8,05
<b>Variáveis do carvão</b>	
Umidade (%)	2,88 ± 0,60
Carbono fixo (%)	71,67 ± 5,41
Matérias voláteis (%)	27,38 ± 5,37
Cinzas (%)	0,95 ± 0,29
Poder calorífico superior (Kcal/Kg)	7.010,67 ± 243,42
Densidade do granel (kg/m <sup>3</sup> )	165,00 ± 5,10
Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	0,293 ± 0,02
Densidade verdadeira (kg/m <sup>3</sup> )	1,42 ± 0,09
Porosidade (%)	79,25 ± 2,45
<b>Outras variáveis</b>	
Rendimento em base seca (%)	32,29 ± 5,01
Porcentagem de tiço em relação a carga de madeira (%)	14,30 ± 6,85
Consumo lenha na câmara de combustão (Kg)	24,30 ± 7,13
Tempo de funcionamento da câmara de combustão (h)	1,52 ± 0,44

Algumas considerações podem ser obtidas da Tabela 7:

1. O rendimento em base seca foi de 32,29% indicando que o sistema de produção de carvão vegetal com forno container é um sistema eficiente, que apresenta um rendimento aceitável. Rendimentos maiores poderão ser encontrados se utilizarmos madeiras com menor teor de umidade.
2. O valor encontrado de 14,3 % de tiços foi um valor elevado. Isto provavelmente foi provocado pelo efeito “parede” que ocorreu em algumas carbonizações. Madeiras que se encontravam em contato com a chapa metálica sofriam carbonização parcial, as faces voltadas para a chapa metálica foram semi-carbonizadas. Este efeito foi mais acentuado principalmente na face do container voltada para a porta do forno, indicando que a porta possuía um menor isolamento térmico que as paredes de alvenaria do forno.
3. Em média, por carbonização, cerca de 4,85% do peso (úmido) total de lenha foi consumido na câmara de combustão. Valor próximo aos 5% consumidos nos sistemas tradicionais de carbonização conforme FERREIRA (2000). Esta madeira foi considerada no cálculo do rendimento em base seca do carvão. Se utilizarmos outros combustíveis para queimarmos na câmara de combustão (resíduos, cascas, tiço, etc.) e desconsiderarmos este peso na conversão em carvão obteremos maiores rendimentos em base seca. Para os testes aplicados neste estudo o rendimento em base seca desconsiderando o consumo na câmara de combustão foi de 33,81%, um aumento de 1,52% em relação ao valor apresentado na tabela 11.
4. O tempo médio de carbonização foi de aproximadamente nove horas e vinte cinco minutos, tempos menores serão obtidos se utilizarmos lenha com teor de umidade inferior a 30%. Em média, era necessário evaporar 0,42 Kg de água por Kg de lenha.
5. O elevado teor de umidade além estender o tempo de carbonização, reduz o rendimento gravimétrico ao consumir parte da carga da lenha para evaporar a água (VALENTE ,1986), o que reduz o rendimento em base seca. Logo espera-se maiores rendimentos ao se utilizar madeira com teores de umidade inferiores ao do experimento.

FERREIRA (1988) obteve 35% de rendimento utilizando lenha com 24%, na primeira retorta tipo container desenvolvida.

6. A temperatura média final de 432 °C coincidiu com estudos realizados por OLIVEIRA et. al. (1982b) que indicavam que os maiores rendimentos em carvão se encontram na faixa dos 400-500 °C. A taxa de aquecimento ficou próximo dos 50 °C/h, taxas de aquecimento obtidas em retortas de laboratório.
7. O teor médio de carbono fixo ficou em 71,67%, superior aos 68,32% obtidos do carvão (testemunha) produzido em fornos de alvenaria utilizando a mesma lenha.
8. O teor de cinzas foi inferior a 1% ,enquanto que o carvão utilizado como testemunha apresentou 2,23%. Esta variação pode ser explicada pelo fato de o forno container não incorporar durante a carga de lenha, carbonização e descarga do carvão materiais estranhos como pedras, terra e outros elementos. O baixo teor de cinzas é um importante referencial para quando se utiliza o carvão para produção de ligas metálicas. Elementos como fósforo e enxofre prejudicam a formação de ligas metálicas e estão presentes em grandes quantidades nas cinzas do carvão (CARMO, 1988, COTTA, 1996).
9. A porosidade média do carvão foi de 79,25 %. Um valor elevado quando comparado com o carvão utilizado como testemunha que obteve uma porosidade de 60%. Estudos realizados por MENDES et. al. (1982), indicam que carbonizações rápidas (taxa de aquecimento elevada) reduzem a densidade aparente. Como a densidade aparente é uma das variáveis no cálculo da porosidade, o valor elevado é cientificamente previsto. SILVA (1988) encontrou resultados em torno de 70% de porosidade no primeiro forno container desenvolvido, porém nos seus estudos não se fazia uso da circulação forçada dos gases, a produção média foi de 4 Kg/h de carvão utilizando lenha com 24% de umidade média, enquanto que a produção média do forno container avaliado neste estudo foi 11,13 Kg/h de carvão (lenha com umidade média de 42%).



Figura 17 – Carvão obtido no forno container no modelo experimental testado

## 4.6. Matriz de correlação

Tabela 8 - Matriz de correlação das variáveis estudadas.  $\alpha = 0,05$ . Correlação maior ou igual a 50%

	DiM	UM	DM	PCSm	PCIm	DA	DV	P	UC	MV	CZ	CF	PCSc	PciC	TC	TA	TF	CC	Tcam	Tico	RBS	
DiM	<b>1,00</b>																					
UM	0,39	<b>1,00</b>																				
DM	0,38	0,19	<b>1,00</b>																			
PCSm	-0,49	-0,33	<b>-0,53</b>	<b>1,00</b>																		
PCIm	-0,43	<b>-0,99</b>	-0,25	0,44	<b>1,00</b>																	
DA	0,25	0,39	0,32	-0,45	-0,43	<b>1,00</b>																
DV	0,16	0,10	-0,02	0,38	-0,05	<b>-0,63</b>	<b>1,00</b>															
P	-0,05	-0,19	-0,18	0,44	0,23	<b>-0,93</b>	<b>0,87</b>	<b>1,00</b>														
UC	0,11	-0,40	-0,07	-0,25	0,35	-0,19	0,08	0,16	<b>1,00</b>													
MV	<b>-0,81</b>	<b>-0,52</b>	-0,32	0,31	<b>0,53</b>	-0,05	-0,18	-0,09	0,07	<b>1,00</b>												
CZ	-0,39	0,36	-0,15	0,33	-0,30	0,02	-0,14	-0,09	<b>-0,88</b>	0,10	<b>1,00</b>											
CF	<b>0,84</b>	<b>0,51</b>	0,34	-0,32	<b>-0,52</b>	0,06	0,20	0,10	-0,04	<b>-1</b>	-0,14	<b>1,00</b>										
PCSc	<b>0,72</b>	<b>0,51</b>	0,34	-0,25	<b>-0,51</b>	-0,04	0,26	0,19	-0,05	<b>-0,98</b>	-0,05	<b>0,97</b>	<b>1,00</b>									
PciC	0,30	<b>0,60</b>	0,24	0,07	<b>-0,56</b>	0,13	0,07	-0,02	<b>-0,84</b>	<b>-0,59</b>	<b>0,68</b>	<b>0,56</b>	<b>0,59</b>	<b>1,00</b>								
TC	0,10	<b>0,61</b>	<b>0,59</b>	<b>-0,63</b>	<b>-0,66</b>	0,42	0,00	-0,26	-0,12	0,00	0,07	0,00	0,01	0,11	<b>1,00</b>							
TA	0,27	<b>-0,64</b>	-0,21	0,13	<b>0,63</b>	-0,36	-0,05	0,22	0,20	-0,20	-0,33	0,21	0,13	-0,09	<b>-0,77</b>	<b>1,00</b>						
TF	<b>0,58</b>	0,15	0,48	<b>-0,79</b>	-0,24	0,06	0,07	0,03	0,16	-0,34	-0,38	0,35	0,27	0,02	0,48	0,16	<b>1,00</b>					
CC	-0,23	-0,50	0,05	0,22	<b>0,50</b>	<b>-0,74</b>	0,47	<b>0,68</b>	0,44	0,27	-0,27	-0,24	-0,18	-0,45	-0,16	0,16	-0,03	<b>1,00</b>				
Tcam	0,05	-0,13	-0,05	0,23	0,15	<b>-0,53</b>	0,48	<b>0,56</b>	<b>0,52</b>	-0,13	-0,43	0,17	0,17	-0,33	-0,22	0,06	-0,21	<b>0,71</b>	<b>1,00</b>			
Tico	<b>0,80</b>	0,34	-0,01	-0,23	-0,36	0,37	-0,17	-0,29	-0,06	<b>-0,71</b>	-0,08	<b>0,71</b>	<b>0,61</b>	0,38	-0,24	0,35	0,14	-0,44	-0,11	<b>1,00</b>		
RBS	-0,19	-0,07	-0,45	<b>0,63</b>	0,14	-0,01	-0,16	-0,08	<b>-0,59</b>	-0,03	0,49	0,00	-0,05	0,46	<b>-0,6</b>	0,31	<b>-0,55</b>	-0,35	-0,12	0,19	<b>1,00</b>	



em que,

DiM = Diâmetro da madeira

UM = Umidade da madeira

DM = Densidade básica da madeira

PCSm = Poder calorífico superior da madeira

PCIm = Poder calorífico na unidade de trabalho

DA = Densidade aparente do carvão

DV = Densidade verdadeira do carvão

P = Porosidade do carvão

UC = Umidade do carvão

MV = Matérias voláteis do carvão

CZ = Teor de cinzas do carvão

CF = Teor de carbono fixo do carvão

PCSc = Poder calorífico superior do carvão

PCSi = Poder calorífico na unidade de trabalho do carvão

TC = Tempo de carbonização

TA = Taxa de aquecimento

TF = Temperatura final média

CC = Consumo de combustível na câmara de combustão

Tcam = Tempo de funcionamento na câmara de combustão

Tiço = % tiço

RBS = Rendimento em base seca

O nível de significância foi de 95% e foram consideradas correlações iguais ou superiores a 50%.

Conforme Tabela 8 algumas correlações foram significativas. As principais conclusões são:

1. Correlação positiva entre diâmetro da madeira e teor de carbono fixo do carvão. É provável que as peças de menor diâmetro fossem de madeira juvenil o que resulta em um menor teor de lignina e conseqüentemente menor teor de carbono fixo.
2. A umidade da madeira parece interferir no rendimento em base seca do carvão, possuindo uma correlação negativa com o mesmo. Esta mesma correlação é evidenciada entre tempo de carbonização e

rendimento em base seca, logo um maior tempo de carbonização é função da umidade da lenha. A madeira ao possuir maior quantidade de água fará com que a fase de secagem se prolongue aumentando o tempo de carbonização, reduzindo a taxa de aquecimento e reduzindo o rendimento em base seca.

3. Parece existir uma correlação negativa entre porosidade, densidade verdadeira e densidade aparente do carvão com temperatura final de carbonização. Estudos realizados por MENDES et. al. (1982) concordam com densidade aparente e verdadeira, mas discordam quanto a porosidade. Entretanto estes resultados são para taxas de aquecimento lenta. Como o processo no forno container possui taxas de aquecimento bastante elevadas, a densidade aparente do carvão é bastante afetada o que altera os resultados de porosidade.
4. A porcentagem de tiço foi afetada pelo diâmetro da madeira. Nos testes aplicados existiu uma correlação positiva entre diâmetro e porcentagem de tiço. Provavelmente este fato esta relacionado com a maior relação cerne/alburno das madeiras de maior diâmetro, e pela não formação da camada de carvão mais ao centro das peças (OLIVERA et. al. 1982a).

#### **4.7. A fornalha celular**

A fornalha teve a função de eliminar a poluição. A chaminé de saída do forno container foi conectada à câmara de combustão da fornalha. A fumaça exaurida passava pela câmara de combustão da fornalha onde era queimada.

A Figura 18 indicava a evolução da temperatura ao longo do tempo em três diferentes pontos da fornalha.

No termopar 5 (antes da célula de queima) tínhamos a evolução da temperatura do gás que entrava na câmara de combustão da fornalha. A temperatura do gás iniciava-se à temperaturas próximas à temperatura ambiente (hora zero), elevando-se ao longo da carbonização até temperaturas próximas a 300 °C no término do processo.

No termopar 6 a temperatura média após a célula de queima foi superior aos 700 °C, principalmente após a quarta hora de carbonização

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

No termopar 7 (após resfriamento) a temperatura do gás de saída varia em quase todo o processo entre 100 e 200 °C, com uma temperatura média de 143 °C.

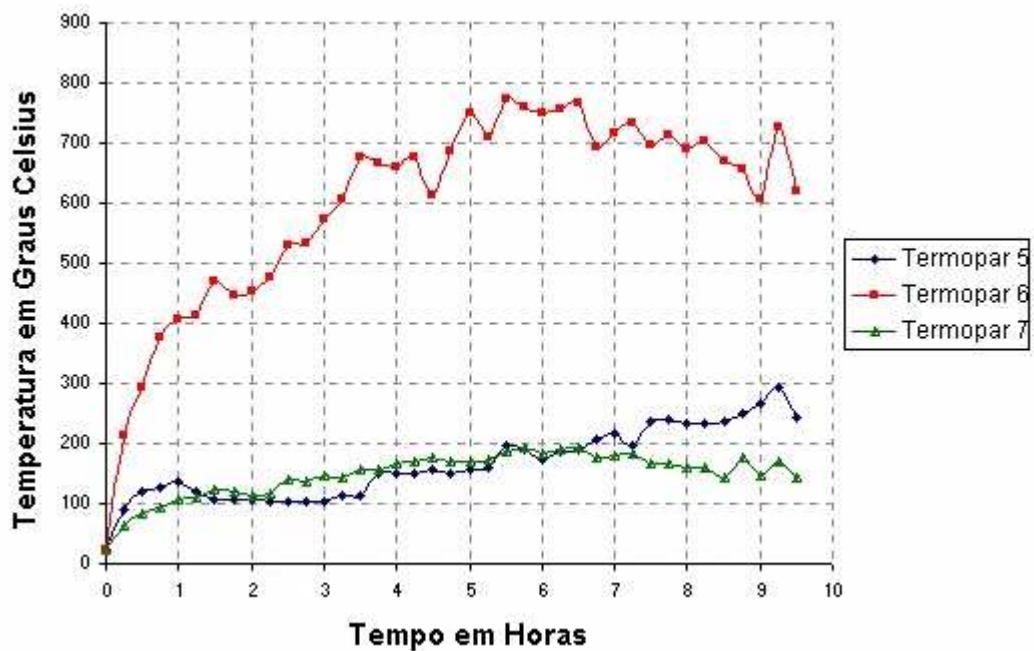


Figura 18 - Evolução média da temperatura em função do tempo em diferentes pontos da fornalha

Com o intuito de explicar o comportamento da temperatura de queima dos gases ao longo do tempo de carbonização, ajustou-se um modelo matemático. O modelo logístico apresentado na Equação 26 e representado na Figura 19 gerou uma curva sigmoide, e representa bem a evolução da temperatura da queima dos gases em função do tempo na fornalha. Foi observado que após a quarta hora de trabalho a fornalha saiu do regime transitório e entrou no regime permanente de trabalho.

$$y = \frac{a}{1 + be^{-cx}}$$

Equação 26

Coefficientes:

a = 710,89

b = 2,79

c = 0,9249

e = Exponencial

Erro padrão: 51,40

Coefficiente de Correlação: 0,9499

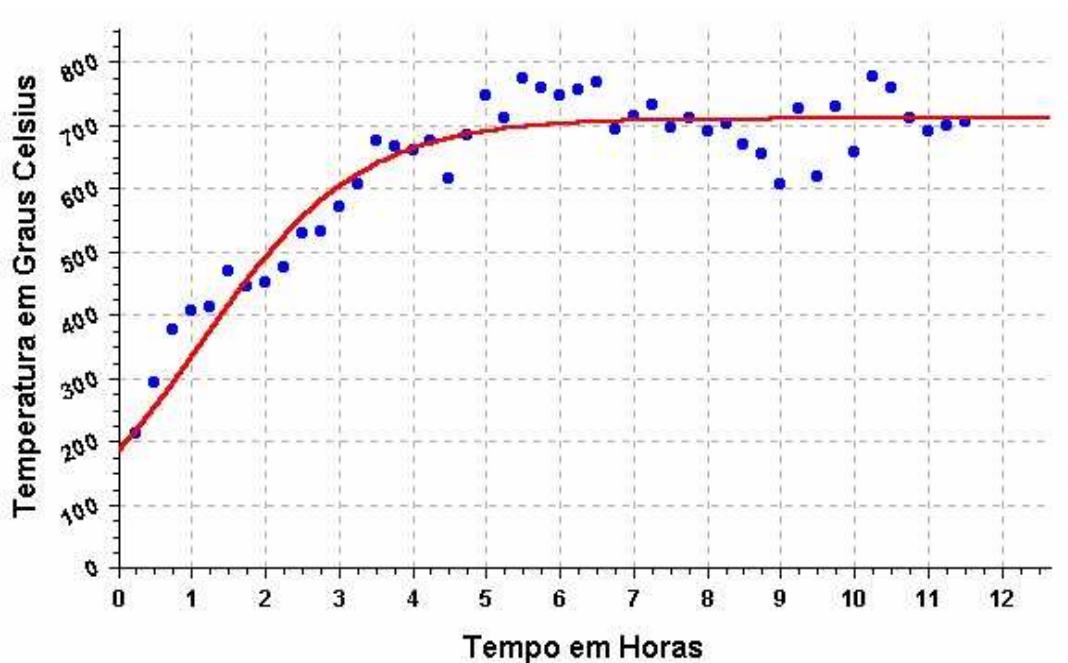


Figura 19 - Evolução média da temperatura após a célula de queima com a linha de ajuste de equação (modelo sigmoideal).

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

A partir da quarta hora o poder calorífico do gás da carbonização

aumentava de maneira significativa propiciando um excedente de energia que reduzia o consumo de combustível na fornalha a níveis mínimos, queimava-se apenas o suficiente para se manter uma “chama piloto”.

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

Conforme Tabela 5 (página 16) um queimador avaliado por MEZERETTE & GIRARD (s.d.) apresentou uma temperatura média de entrada do gás de 90 °C e a de saída após a queima do gás de 410 °C. A fornalha celular apresentou um melhor aproveitamento da energia, a média da temperatura de entrada do gás foi de 185 °C e a de saída superior aos 630 °C. Contudo, este resultado leva em consideração a fase de aquecimento da fornalha, se desconsiderarmos esta fase, obteremos temperaturas de saída superiores aos 700 °C. Temperaturas mais elevadas indicam melhor queima da fumaça, logo, espera-se que a fornalha celular apresente maior eficiência na eliminação da poluição do que o queimador apresentado por MEZERETTE & GIRARD (s.d.), necessitando de estudos adicionais que comprovem esta afirmação.

#### **4.8. Balanço de massa e energia**

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

Conforme tabela 9 temos ao final do processo um pouco mais de 53% da energia inicial prevista, na forma de carvão. Os outros 47 % da energia inicial está sendo perdida, e grande parte deste “desperdício” podem ser aproveitado.

Tabela 9 – Balanço de massa e energia dos combustíveis utilizados e resultantes do processo de carbonização com forno container em conjunto com a fornalha celular para uma tonelada de lenha em base úmida .\*\*

<i>Tipo</i>	<i>Massa (Kg)</i>		<i>PCI (Kcal/kg)</i>	<i>Energia (Kcal) (Massa x PCI)</i>		<i>Energia (%)</i>	
	<i>Entrada</i>	<i>Saída</i>		<i>Entrada</i>	<i>Saída</i>	<i>Entrada</i>	<i>Saída</i>
Madeira	1.000,00	-	2045,15	2.045.000,00	-	84,58	-
Combustível. da fornalha	53,64	-	6951,57	372.882,21	-	15,42	-
Carvão	-	186,11	6951,57	-	1.293.756,69	-	53,50
Perdas e excedente*	-	-	-	-	1.124.125,52	-	46,50
Total	-	-	-	2.417.882,21	2.417.882,21	100	100

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

Se considerarmos que nas perdas e excedentes do processo (Tabela 9) um aproveitamento de 50%, obteremos o equivalente a 562.062,76 kcal de energia disponível para uso. Se considerarmos uma eficiência de 25% na conversão vapor → mecânica (BRASIL, MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 1982) e de 80% na conversão mecânica → elétrica (BRASIL, MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 1982) obteremos 112.412,55 kcal o que é equivalente a 130.398,56 W.

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

#### **4.9. Avaliação econômica (avaliação de projetos)**

Propõem-se fazer uma avaliação hipotética de projetos, considerando custos reais de mercado, comparando o sistema tradicional de carbonização (fornos tipo rabo quente) com o sistema de carbonização em que se utiliza o forno tipo container.

Os dados para análise são:

- Fornos tipo rabo quente: 3,20 m de altura por 2 m de diâmetro;

- Fornos tipo container: 2,20 m de altura por 1,90 de diâmetro;
- Produção mensal de 3.000 MDC/mês;
- Horizonte de planejamento de 20 anos;
- Taxas de juros anuais variando de 2% a 50%;
- Preço do carvão à 39,00 R\$/MDC;
- Preço da lenha entregue no pátio: 13,50 R\$/st;
- Salário mínimo: 180,00 R\$;
- Encargos salariais (fator): 1,8.
- Número de salários mínimos utilizados:
  - 1 salário para auxiliar;
  - 1,3 para o carvoeiro;
  - 1,5 para o carbonizador
  - 2 para o coordenador.

Tabela 10 – Custo de implantação dos sistema rabo quente e container.

Tipo de Forno	Vida útil (anos)	Produção mensal (MDC/forno)	Quantidade de fornos (UN)	Custo de cada forno (R\$)	Custo de implantação (R\$)
Rabo Quente	5	24	125	380,00	47.500,00
Container	10	150	20	15.000,00	300.000,00

Tabela 11 – Descrição das receitas anuais provenientes da venda de carvão nos sistema rabo quente e container.

Tipo de Forno	Total (R\$/mês)	Total (R\$/ano)
Rabo Quente	117.000,00	1.404.000,00
Container	117.000,00	1.404.000,00

Tabela 12 - Número de empregados nos sistema rabo quente e container.

Tipo de Forno	Auxiliar	Carvoeiro	Carbonizador	Coordenador
Rabo Quente	2	20	4	2
Container	1	10	2	1

Tabela 13 – Descrição das receitas e despesas anuais nos sistema rabo quente e container.

Tipo de Forno	Despesas (R\$/ano)	Receitas (R\$/ano)	Receita - despesa (R\$/ano)
Rabo Quente	1.193.844,00	1.404.000,00	210.156,00
Container	1.125.072,00	1.404.000,00	278.928,00

Tabela 14 - Descrição das despesas nos sistema rabo quente e container.

Tipo de Forno	Mão-de-obra (R\$/mês)	Manutenção (R\$/mês)	Eletricidade (R\$/mês)	Custo da lenha (R\$/mês)	Total anual (R\$)
Rabo Quente	12.312,00	6.175,00	0,00	81.000,00	1.193.844,00
Container	6.156,00	6.000,00	600,00	81.000,00	1.125.072,00



Tabela 15 – Avaliação dos projetos utilizando-se de índices econômicos para avaliar os sistemas de produção

<i>Índice</i>	<i>Container</i>	<i>Rabo Quente</i>
1 - Tempo de retorno do capital investido 'payback'	13 meses	3 meses
2 - Razão receita-custo	9,79	23,92
3 - Razão receita média custo	8,79	1,20
4 - Taxa interna de retorno	93%	442%
Taxa de Fisher*	<7%	>7%
5 - Razão custo benefício*	2 a 9	9 a 22
6 - Valor presente líquido*	< 26%	>26%

\* Considerando juros de 2 a 50%

Quando não consideramos o valor do capital no tempo (índices 1, 2 e 3 tabela 15), o projeto com forno tipo rabo quente, apresenta melhores resultados em dois dos três índices analisados. Conforme índice 1 em apenas 3 meses temos o retorno do capital investido no sistema de carbonização com forno do tipo rabo quente. Provavelmente este foi um dos motivos que fez com que a tecnologia de carbonização não evoluiu-se até os dias de hoje. É um investimento de rápido retorno e elevada razão receita/custo (índice 2 tabela 15), o que torna projetos que utilizam tecnologias de maior investimento na maioria das vezes inviáveis. O forno tipo container apresenta maior razão receita média sobre custo (índice 3 tabela 15). Em valores absolutos de capital a rentabilidade é maior, fato este ocasionado pelo baixo valor dos custos variáveis (manutenção e mão de obra).

Quando consideramos o valor do capital no tempo (índices 4, 5 e 6), o investimento utilizando o forno tipo container é vantajoso em duas situações:

1. A taxa de juros anual é menor que 26% para o valor presente líquido (índice 6). Acima dos 26% os valores se igualam e taxas maiores de juros favorecem o projeto que utiliza fornos do tipo rabo quente. Considerando a atual conjuntura no Brasil de taxas anuais em 18,75%, o método do valor presente líquido favorece o projeto que faz uso de fornos containers.
2. A taxa de juros anual é menor que 7% para a taxa interna de retorno

resultado este obtido pela taxa de Fisher, que foi utilizada pois o projeto de menor investimento apresentou maior taxa interna de retorno (índice 4).

#### **4.10. Forno container x sistemas tradicionais**

Quase toda a produção de carvão vegetal do Brasil é proveniente de sistemas de produção que utilizam fornos de carbonização rudimentares que em resumo apresentam as seguintes características:

- 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 são más condutoras 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, dos 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) O treinamento de mão de obra é extremamente dificultado em função do empirismo com que se conduz a carbonização nos fornos de alvenaria coloração de fumaças, temperatura externa das paredes do forno, aparência dos tatus, etc;
- 7) Dificuldade de padronizar a rotina de carbonização em fornos de alvenaria;

Os modelos de fornos containers construídos até agora mostraram que o forno container possui promissoras vantagens quando comparados aos sistemas tradicionais:

- 1) Durabilidade não necessitando de reparos contínuos como os fornos de alvenaria tradicionais,

- 2) Rápido resfriamento do carvão vegetal (12 horas), contra três a quatro dias nos sistemas convencionais;
- 3) A carga de lenha e descarga do carvão podem ser mecanizadas;
- 4) Humaniza o trabalho nas carvoarias, porque a carbonização dura de 6-12 horas, o trabalho pode ser organizado em turnos e o operador não necessita ficar vigiando a carbonização dia e noite. Além disso, os trabalhadores não ficam expostos à inalação das emissões poluentes;
- 5) O controle da carbonização pode ser feito por temperatura e não por coloração de fumaças e outros critérios subjetivos, facilitando o treinamento dos carvoeiros;
- 6) A descarga mecanizada do carvão reduz a emissão de finos, contribuindo para um ambiente de trabalho mais saudável;
- 7) É obtido carvão de boa qualidade no forno container, apresentando o produto, as mesmas propriedades (composição química, densidade, resistência mecânica, poder calorífico, etc.) do carvão produzido em fornos de alvenaria ou retorta de laboratório, com a vantagem de que no forno container não são incorporados minerais estranhos (pedras e terra), como ocorre durante o manuseio do carvão em carvoarias tradicionais;
- 8) Podem ser obtidos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, na faixa de 28% a 38% contra de 25% a 33% nos fornos de alvenaria tradicionais;
- 9) Pode-se recuperar o alcatrão vegetal e pirolenhosos, utilizando-se o sistema de condensação. Caso não seja de interesse preparar o alcatrão, as fumaças do leito de carbonização podem ser conduzidas a um queimador e incineradas, gerando calor sensível, que pode ser aproveitado para geração de vapor ou secagem de lenha;
- 10) O treinamento de mão de obra e padronização de atividade é facilitado porque a operação de fornos se baseia em leitura instrumental (indicação de temperatura) e não em critérios subjetivos. Isso possibilita o estabelecimento de rotinas de trabalho mais uniformes e padronizadas, indo de encontro aos princípios de

qualidade total;

11) Elevada produtividade – 2 a 3 ciclos diários contra 1 ciclo semanal dos sistemas tradicionais.

#### **4.11. Propostas para os próximos projetos**

Propõem-se para os outros projetos as seguintes modificações, que visam otimizar o sistema forno container em conjunto com a fornalha celular.

- Redução no diâmetro dos furos localizados no fundo container e melhor distribuição dos mesmos ao longo de toda área da chapa . A redução no diâmetro e a melhor distribuição dos furos visa otimizar a entrada de calor e oxigênio, em especial no início do processo quando necessitamos introduzir estas duas variáveis em excesso. Espera-se que estas alterações melhorem a homogeneidade da carbonização dentro do container.
- Percebeu-se o efeito “parede” em algumas carbonizações. Madeiras que se encontravam em contato com a chapa metálica sofriam carbonização parcial, as faces voltadas para a chapa metálica eram semi-carbonizadas. Sugere-se para este problema a colocação de “anéis” na parte superior, mediana e inferior no cilindro metálico, evitando o contato direto da madeira com a chapa metálica.
- Aumentar a capacidade isolante da porta do forno. Verificou-se a tendência à aparecimento de tiços na face do container voltada para a porta, fato ocasionado por um isolamento pouco eficiente.
- Utilização de condutos na saída da câmara de combustão do forno em pontos distribuídos regularmente ao longo do container evitando áreas mais aquecidas do container, ou a utilização de duas ou mais câmaras de combustão distribuídas de maneira uniforme na base do forno.
- Aumento da extensão da saída da câmara de combustão da fornalha. A carbonização ao alcançar a fase do alcatrão (temperatura média acima dos 300 °C), formava-se uma labareda de fogo de aproximadamente 2 metros de comprimento, que às vezes chegava ao ciclone de resfriamento e caso não houvesse a intervenção do

operador na abertura das entradas de ar secundária a estrutura do ciclone bem como o funcionamento do ventilador poderiam ficar comprometidos.

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho foi realizado no setor de armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) e no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal (DEF) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa – MG.

Foi projetado e construído um forno para produção de carvão vegetal. Em conjunto com o forno construiu-se uma fornalha tradicionalmente utilizada para aquecimento direto na secagem de grãos, que teve como objetivo queimar o gás de carbonização proveniente da carbonização da madeira.

Nos testes, foram avaliados variáveis da madeira (umidade, densidade e tamanho das peças), variáveis do processo (tempo de carbonização, temperatura final média de carbonização, rendimento em base seca e taxa de aquecimento) variáveis do produto carvão (teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, poder calorífico, densidades verdadeira e aparente e porosidade).

Considerando-se as condições do experimento obteve-se as seguintes conclusões:

1 - Quanto ao produto carvão produzido:

- Qualidade de carvão similar aos dos sistemas tradicionais.
- Baixo teor de cinzas do carvão, o que é vantajoso para alguns usos do carvão como a produção de ligas metálicas.
- Maior porosidade, o que favorece a reatividade do carvão nas

reações o alto-forno, entretanto esta variável pode ocasionar redução resistência a compressão do carvão, variável não avaliada neste trabalho.

2 - Quanto ao processo de carbonização:

- Rendimento em base seca aceitável.
- Controle do processo através da temperatura dos gases da carbonização.
- Acompanhamento da evolução da temperatura média de carbonização pelo operador ao longo do tempo através de um modelo matemático sigmoidal ajustado.
- Estabelecimento de um perfil térmico médio do forno.

3 – Quanto ao controle da poluição:

- Eliminação quase que total da poluição através da queima dos gases na fornalha.

4 – Quanto ao balanço de massa e energia

- Grande perda de energia na conversão madeira-carvão e na queima do gás de carbonização. Mais de 45% da energia do total do sistema é perdida.
- Possibilidade de aproveitamento de grande parte desta energia.

5 - Viabilidade econômica para projetos de carvoaria utilizando fornos do tipo container.

6 - Vantagens técnicas, ambientais, energéticas, ergonômicas e até econômicas quando comparado com os sistemas tradicionais de carbonização.

## 6. SUGESTÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo sugere-se:

- Aplicação de testes que elaborem um perfil térmico que avalie também o gradiente de temperatura entre o centro do container e a sua periferia.
- Estudos com a utilização de secadores, caldeiras e turbinas entre outros equipamentos como opções de aproveitamento do excesso de energia que o sistema forno container-fornalha possui.
- Determinação precisa com a utilização de um analisador de gás dos compostos químicos que estão sendo liberados na atmosfera proveniente da queima do gás de carbonização, nas diferentes fases, da fase de secagem à fase final.
- Avaliação de variáveis de qualidade do carvão não avaliadas neste estudo com o forno container como: classificação granulométrica, resistência mecânica e geração de finos.
- Estudos considerando regime permanente de trabalho. Os testes foram realizados em regime transitório; a câmara de combustão do forno aquecia o container que por sua vez aquecia o forno de alvenaria. Possivelmente obter-se-á resultados diferentes, se com o forno aquecido, alocarmos um segundo container carregado com madeira para ser carbonizado. A inércia de aquecimento do forno já



estará vencida e obteremos melhor aproveitamento da energia, e variáveis como tempo de carbonização, taxa de aquecimento e consumo na câmara de combustão provavelmente serão afetadas.

- Os modelos matemáticos encontrados neste estudo são válidos para as condições do experimento. Outros modelos provavelmente serão encontrados ao variarmos as condições do experimento (espécie, umidade, densidade e diâmetro da lenha), sendo necessário a aplicação de teste de identidade de modelos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRACAVE - Associação Brasileira de Carvão Vegetal. 2001. **Anuário estatístico**. <http://www.abracave.com.br>.

ALMEIDA, M.R.; REZENDE, M.E.A. 1982. **O Processo de carbonização contínua da madeira**. In: Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. 393p.

ALMEIDA, M.R. 1982. **Recuperação de alcatrão em fornos de alvenaria**. IN: Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. 393p.

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.

BASTOS FILHO, J. G. 1988. **Desenvolvimento e teste de um forno metálico para carbonização de madeira**. Viçosa, UFV. 37p. (tese M. S.).

BARSA. 1998. **Carvão**. Enciclopédia Britânica do Brasil. Edição em CD-ROM.

BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2001). **Balanço Energético Nacional - BEN 2000**. Brasília. 154 p.

BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. 1982. **Biomassa, biocombustíveis, bioenergia**. Elaboração de Jorge Cals Coelho, Brasília, 100p.

CARMO, J. S. 1988. **Propriedades físicas e químicas do carvão vegetal destinado a siderurgia e metalurgia**. Monografia. Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 40p.

COTTA, A.M.G. 1996. **Qualidade do carvão vegetal para siderurgia**. Monografia. Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 35p.

EGREJA, C. M 1999.. **Produção de adesivos fenólicos a partir do creosoto vegetal desmetilado**. Viçosa, UFV. 67p. (Tese M.S.).

FERREIRA, L. H. C. 1988. **Desenvolvimento de uma retorta metálica para carbonização de madeira**. Viçosa, UFV, 47p. (Tese M.S.)

FERREIRA, O. C. 2000. **Emissão de gases de efeito estufa na produção e consumo do carvão vegetal**. In: Economia e Energia. Ano III. Setembro/Outubro. <http://ecen.com/eee21/emiscar.htm>.

LÚCIO, Á. VIEIRA, S. P. DELFINO, A. PIDNER, H. (2000). **Forno de carbonização contínua em módulos horizontais**. In: Melhoria Contínua da Carbonização da Madeira -. Seminário Interno Vallourec & Mannesmann Tubes. Paraopeba – MG. 32 p.

MARRI, A. OLIVEIRA, J. B. de. MENDES, M. G. GOMES, Paulo Aguinélio. 1982. **Manual de construção e operação de fornos de carbonização**. Fundo Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. Belo Horizonte, 55 p.

MEDEIROS, C.A. & REZENDE, M. E. A. 1983. **Alcatrão vegetal; perspectivas de produção e utilização**. Rev. Fundação João Pinheiro 13 (9-12) : 42-48.

MENDES, M. G. GOMES, P. A. OLIVEIRA, J. B. 1982. **Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal**. In: produção e utilização de carvão vegetal. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais -CETEC. 393p.

MEZERETTE, C. & GIRARD, P. **Environmental aspects of gaseous emissions from wood carbonization and pyrolysis processes.** Centre Technique Forestier Tropical, France, 20 p.

NATIONAL ASSOCIATION OF FAN MANUFACTURERS – NAFM. 1952. **Standards, definitions, terms and tests codes for centrifugal, axial and propeller fans.** 2 ed. Detroit, NAFM. 34p.

OLIVEIRA, J. B. de., GOMES, P.A., ALMEIDA, M. R. de. 1982a. **Propriedades do carvão vegetal.** In: Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, controle de qualidade. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. 173p.

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

OLIVEIRA, J. B. de; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. DE. 1982c. **Estudos Preliminares de Normalização de Testes de Controle de Qualidade do Carvão Vegetal.** In: Carvão Vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. 173p.

PIMENTA, A.S., BAYONA, J. M. RAMÓN, T. G. & CÁNOVAS, A.M.S. 1999. **Evaluation of acute toxicity and genotoxicity of liquid products from pyrolysis of *Eucalyptus grandis* wood.** Archives of Environmental Contamination and Toxicology.

PINHEIRO P. C. C. & SAMPAIO. 2001. **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.

RAAD, T. J. (2000). **Instrumentação dos fornos industriais da V & M florestal** In: Melhoria Contínua da Carbonização da Madeira. Seminário Interno Vallourec & Mannesmann Tubes. Paraopeba – MG. 32p.

REZENDE, J. L. P. & OLIVEIRA, A. D. 1993. **Avaliação de projetos florestais.** Universidade Federal de Viçosa. Imprensa universitária. Viçosa – MG. 55 p.

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

SBS **SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA**. 2001. <http://www.sbs.org.br>.

SCHOUT, Christian. GARDEL, Décio. **Forno de carbonização contínua em módulos verticais**. In: Melhoria Contínua da Carbonização da Madeira - 2000. Seminário Interno Vallourec & Mannesmann Tubes. Paraopeba – MG. 32p.

SEYE, O.& PINHEIRO, P. C. C. , 2001. **Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus***. In: Primeiro Congresso Internacional de Uso da Biomassa Plantada para Produção de Metais e Geração de Eletricidade. Belo Horizonte – MG. Versão em CD-ROM.

SILVA, I D da. 1998. **Projeto, construção e teste de uma fornalha a carvão vegetal para secagem de café**. Viçosa, UFV,. 81p. (tese M.S.).

SILVA, J. R. M. 1994. **Desenvolvimento de um forno de carbonização com cúpula metálica móvel**. Viçosa, UFV, 41 p. (tese M.S.).

SILVA, J. S. PRECCI, R. L. & MACHADO, M. C. 2000. **Fornalha a carvão vegetal para secagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Associação dos engenheiros agrícolas de Minas Gerais/UFV, DEA. 24p.

TRUGILHO, P.F. 1988. **Influência do tempo de funcionamento da câmara de combustão, no rendimento da carbonização, em forno de alvenaria**. Viçosa, UFV. 58 p. (tese M. S.).

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

VELLA, M. M. C. F. 1989. **Influência da velocidade de carbonização da madeira nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido**. Viçosa, UFV. 53 p. (tese M. S.).

VITAL, B.R. 1984. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG, SIF, 21p. (Boletim técnico, 1).