

# Desenvolvimento e construção de fornalha para biomassa com sistema de aquecimento direto e indireto do ar

Fernanda Augusta de Oliveira Melo<sup>1\*</sup>, Jadir Nogueira da Silva<sup>2</sup>, Juarez Sousa e Silva<sup>2</sup>, Cristiane Pires Sampaio<sup>2</sup> e Denise Freitas Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Energia na Agricultura, Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs, s/n, 36570-000, Campus Universitário, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. <sup>2</sup>Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. \*Autor para correspondência. E-mail: faomelo@yahoo.com.br

**RESUMO.** Uma fornalha, com opção para aquecimento direto e indireto de ar, foi projetada e construída para utilizar, como combustível complementar à lenha, biomassa particulada, resíduo agroindustrial abundante e desperdiçado em boa parte. No intuito de verificar o funcionamento da fornalha, na opção de aquecimento direto e indireto, foram realizados três testes preliminares utilizando somente lenha como combustível. Nestes testes, avaliaram-se as temperaturas do ar ambiente, do ar aquecido na saída da fornalha e depois do ventilador, fluxo de ar, poder calorífico inferior e eficiência térmica. Com os dados obtidos nos testes, nas opções de aquecimento direto e indireto de ar, a fornalha mostrou-se flexível na opção de aquecimento, de fácil construção e operação, não exigindo mão-de-obra qualificada.

**Palavras-chave:** fornalhas, aquecimento de ar, energia na agricultura.

**ABSTRACT. Development and construction of a furnace for biomass with system of direct and indirect air heating.** A furnace, with a system for direct and indirect air heating, was projected and constructed to use biomass, particulate biomass, abundant and largely wasted agroindustrial refuse, as complementary fuel to firewood. With the objective of verifying furnace operation, in the option of direct and indirect heating, three preliminaries tests were conducted using only firewood as fuel. In these tests, the following variables were monitored: room air temperature, heated air temperature at the exit of the furnace and after the fan; room air relative humidity; warm air flow; lower calorific power and thermal efficiency of the furnace. In the tests the results showed, for both direct and indirect air heating, the furnace was shown to be flexible in the heating option, of easy construction and operation, not requiring skilled labor.

**Key words:** furnaces, air heating, energy in agriculture.

## Introdução

No meio rural, o desenvolvimento é cada vez mais dependente de energia. Dentre as atividades agrícolas, a secagem de produtos agrícolas e o aquecimento de ambientes para a criação intensiva de animais estão entre as que mais utilizam energia na forma térmica.

Fornalhas são dispositivos projetados para assegurar a queima completa do combustível, de modo eficiente e contínuo, visando ao aproveitamento de sua energia térmica liberada na combustão, com o máximo de rendimento na conversão da energia química do combustível em energia térmica. As fornalhas podem ser classificadas como de fogo direto, em que os gases resultantes da combustão são misturados com o ar ambiente e insuflados por um ventilador, diretamente na massa de grãos; e de fogo indireto, em que os gases

provenientes da combustão passam por um trocador de calor que aquece o ar de secagem.

Atualmente, as fornalhas utilizadas não têm flexibilidade na opção para aquecimento do ar e do combustível a ser empregado. No meio rural, dependendo do tipo de produto a ser seco, o ar aquecido deve ser ou não isento de impurezas (fumaça, particulados, monóxido de carbono etc.). Além do mais, cada fornalha é projetada para um determinado tipo de combustível, portanto o emprego de outro resultará, normalmente, em mau funcionamento e, conseqüentemente, o produtor terá de adquirir uma fornalha para cada situação; ou seja, com aquecimento direto ou indireto do ar.

Em áreas rurais de países em desenvolvimento a biomassa representa cerca de 34% do total do suprimento energético, sendo que essa utilização é

convencional, ou seja, sem recursos tecnológicos. Já em países desenvolvidos, a participação da biomassa na matriz energética é menos expressiva, porém o seu aproveitamento é mais eficiente face às tecnologias utilizadas como processos de combustão mais eficientes, gaseificação e pirólise da biomassa e co-geração (SORDI et al., 2005).

Os sistemas para aquecimento de ar que utilizam combustíveis sólidos possuem características semelhantes na sua construção e diferem apenas na forma, no tamanho e na localização da entrada do ar utilizado como comburente, no sistema de alimentação, na saída dos produtos da combustão, podendo ser de fluxo descendente ou ascendente. Comumente, as fornalhas destinadas à queima de combustíveis sólidos pulverizados (serragem, moinha de carvão, palha de café, palha de arroz etc.), devem possuir, além dos componentes essenciais a todas as fornalhas, depósito de combustível e sistema de alimentação e distribuição.

Os principais parâmetros para o correto dimensionamento de uma fornalha são: o volume da câmara de combustão, a área da grelha ou da célula de queima e as aberturas de entrada de ar primário e secundário. O tamanho e a forma de uma fornalha dependem da natureza do combustível, dos dispositivos de queima e da quantidade de calor a ser liberado em um intervalo de tempo, pois cada combustível apresenta propriedades distintas.

O volume da câmara de combustão é um dos requisitos de maior importância dentro do projeto de fornalhas, uma vez que toda a energia proveniente da combustão deve ser incorporada aos gases num volume suficiente para que se desenvolva a chama e se complete a combustão, antes que os gases quentes possam se exaurir. Um parâmetro importante e que define a relação entre energia liberada e volume da câmara de combustão é a carga térmica volumétrica. A literatura apresenta vários valores para este parâmetro, mas não identifica casos individuais. Este parâmetro não pode ser calculado por meio teórico e tem sido determinado com base em estudos de caso sobre instalações existentes.

A câmara de combustão e a grelha de uma fornalha podem ser dimensionadas com base nos valores de consumo de combustível, da taxa de liberação de calor e da taxa de combustão de outra fornalha com as mesmas características técnicas.

A taxa de combustão representa a massa de combustível queimado por unidade de área de grelha, por unidade de tempo; é o parâmetro de

projeto para o dimensionamento de grelhas.

A tensão térmica da grelha é um parâmetro importante para a escolha do material a ser utilizado na construção das grelhas, pois, diferentemente da taxa de carregamento, ela leva em consideração a energia térmica liberada pelo combustível sobre a grelha. Segundo Vlassov (2001) a tensão térmica cita valores entre 1.100 a 1.600 kW m<sup>-2</sup> para fornalhas com tiragem forçada e 400 kW m<sup>-2</sup> para fornalhas com tiragem natural. Valores acima dos recomendados provocam temperaturas excessivamente altas, podendo levar à formação de escórias sobre a grelha, deformação e diminuição de sua vida útil.

Segundo Vlassov (2001), para a queima de combustíveis sólidos finos, o melhor processo é a queima em suspensão. O sistema para queima em suspensão consiste em introduzir o combustível convenientemente preparado (pulverizado) na fornalha, por meio de um processo pneumático de alimentação na sua parte lateral superior, em condições de se queimar todo ou quase todo em suspensão, movimento turbilhonar. As partículas finas dos combustíveis facilmente arrastam-se pelo ar e pelos gases. A queima ocorre na câmara de combustão em um tempo muito curto, e o tempo de permanência do combustível na câmara de combustão é muito pequeno. Sabe-se que os combustíveis sólidos queimam-se a partir da superfície. Assim, para elevar a potência da fornalha, uma das alternativas é aumentar a área da superfície do combustível em contato com o ar. Esse sistema é indicado quando o combustível está disponível na forma de matéria pulverizada, como a serragem de indústrias de processamento de madeira; de outra forma, a preparação do combustível se torna muito cara.

A queima em suspensão em pequenas unidades, para o aproveitamento de resíduos agrícolas e agroindustriais, deve ser realizada por meio de equipamentos de alimentação e distribuição mais simples e que permitam trabalhar com biomassa na forma como ela é disponibilizada, ou seja, dimensões de partículas e teores de água acima dos recomendados. Para isso, as fornalhas devem possibilitar a queima em semissuspensão, contendo, em sua estrutura, a grelha, pois apenas parte do material será queimado em suspensão e as partículas mais pesadas irão completar sua queima sobre a grelha.

O emprego da grelha também tem a finalidade de manter uma chama-piloto sobre ela, para iniciar e manter a temperatura necessária à queima dos combustíveis pulverizados na fornalha. A lenha é o

combustível mais indicado no meio rural para o uso como chama-piloto, pela sua disponibilidade e facilidade de obtenção ao longo do ano.

Diante do exposto, objetivou-se, neste trabalho, o desenvolvimento e a construção de um sistema de aquecimento de ar, com opção para aquecimento direto e indireto de ar, podendo utilizar resíduos agroindustriais, desperdiçados na maioria das vezes, como combustíveis alternativos para a secagem de produtos agrícolas.

### Material e métodos

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi projetada e construída uma fornalha com opção para aquecimento direto ou indireto de ar, a fim de utilizar a biomassa particulada como combustível complementar à lenha. O trabalho foi realizado no Laboratório de Energias Alternativas Prof. Juarez de Sousa e Silva, Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, situada no município de Viçosa, Estado de Minas Gerais.

### Dimensionamento da fornalha para biomassa

Uma fornalha bem projetada deve apresentar dimensões mínimas, mas suficientes para uma combustão eficiente e com o mínimo de excesso de ar.

A energia a ser fornecida foi calculada considerando-se os itens descritos a seguir:

- a vazão volumétrica de ar ( $\dot{V}_{ar}$ ) de  $0,67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , que foi baseada em testes preliminares realizados. Silva (2001) recomendam taxa de  $10 \text{ m}^3$  de ar  $\text{min}^{-1} \text{ m}^{-2}$  de grãos a serem secados;

- a temperatura média do ar ambiente adotada foi de  $20^\circ\text{C}$ , considerando o período em que seriam realizados os testes, e a temperatura do ar de secagem igual a  $50^\circ\text{C}$ , como recomendado por Silva (2001), para secadores de camada fixa. Assim, para efeito de cálculo, o incremento médio da temperatura do ar foi de  $30^\circ\text{C}$ ;

- considerando a média das temperaturas de entrada ( $20^\circ\text{C}$ ) e de saída ( $50^\circ\text{C}$ ) do sistema, utilizou-se o calor específico ( $c_p$ ) do ar de secagem, considerando-o como gás perfeito, segundo Van Wylen et al. (2003), igual a  $1,007 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ;

- nas condições de temperatura e pressão em que a fornalha funcionou, para temperaturas próximas à ambiente, o ar tem comportamento de um gás ideal, de fator de compressibilidade ( $Z$ ) igual a 1; pode-se utilizar a equação de estado dos gases perfeitos para a

determinação da massa específica média do ar de secagem; o valor adotado foi de  $1,1460 \text{ kg m}^{-3}$ ;

- a fornalha foi dimensionada para utilizar como combustíveis a palha de café (na opção de fogo indireto) e moinha de carvão (fogo direto), associados à lenha. O poder calorífico inferior (PCI) adotado da palha de café foi de  $15.434 \text{ kJ kg}^{-1}$  e da moinha de carvão de  $13.074 \text{ kJ kg}^{-1}$ . A eficiência térmica da fornalha adotada para os cálculos foi de 30%, rendimento médio das fornalhas de fogo indireto, segundo Silva (2001).

De acordo com as considerações citadas, as etapas envolvidas no dimensionamento da fornalha relativo aos cálculos de energia para aquecimento do ar e consumo de combustível foram:

Determinação da vazão mássica de ar (Equação 1).

$$\dot{m}_{ar \text{ aquecido}} = \rho_{ar} \dot{Q}_{ar} \quad (1)$$

em que:

$\dot{m}_{ar \text{ aquecido}}$  = vazão mássica de ar aquecido,  $\text{kg h}^{-1}$ ;

$\rho_{ar}$  = massa específica do ar,  $\text{kg m}^{-3}$ ;

$\dot{Q}_{ar}$  = vazão volumétrica,  $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

### Potência da fornalha

A quantidade de energia a ser liberada pela fornalha para atender à determinada demanda (Equação 2).

$$\dot{q}_u = \dot{m}_{ar \text{ aquecido}} \bar{c}_{p_{ar}} (T_{as} - T_{amb}) \quad (2)$$

em que:

$\dot{q}_u$  = energia necessária para aquecer o ar,  $\text{kJ h}^{-1}$ ;

$\bar{c}_{p_{ar}}$  = calor específico médio do ar,  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$T_{as}$  = temperatura do ar de secagem,  $^\circ\text{C}$ ;

$T_{amb}$  = temperatura do ar ambiente,  $^\circ\text{C}$ .

### Consumo de combustível

Conhecendo-se a quantidade de energia a ser fornecida pela fornalha, por unidade de tempo, pode-se determinar o consumo de combustível para atender à demanda de energia requisitada (Equação 3).

$$\dot{m}_{cb} = \frac{\dot{q}_u}{\text{PCI } \eta} \quad (3)$$

em que:

$\dot{m}_{cb}$  = fluxo mássico de combustível,  $\text{kg h}^{-1}$ ;

PCI = poder calorífico inferior do combustível,  $\text{kJ kg}^{-1}$ ;

$\eta$  = rendimento térmico da fornalha, 30%.

De posse da quantidade de energia para aquecimento do ar, da vazão mássica do combustível e do seu poder calorífico, procedeu-se aos cálculos referentes às partes constituintes da fornalha, de acordo com as etapas descritas a seguir.

#### Volume da câmara de combustão

O volume da câmara de combustão foi determinado em função do produto do consumo de combustível com o poder calorífico inferior em razão da carga térmica volumétrica (Equação 4). De acordo com a literatura, foi fixado o valor de  $175 \text{ kJ s}^{-1} \text{ m}^{-3}$  para a carga térmica volumétrica (K) para a fornalha em questão.

$$\dot{v}_{cc} = \frac{\dot{m}_{cb} \text{ PCI}}{K} \quad (4)$$

em que:

$\dot{v}_{cc}$  = volume da câmara de combustão,  $\text{m}^3$ ;

$\dot{m}_{cb}$  = fluxo mássico de combustível,  $\text{kg h}^{-1}$ ;

PCI = poder calorífico inferior do combustível,  $\text{kJ kg}^{-1}$ ;

K = carga térmica volumétrica,  $\text{kJ s}^{-1} \text{ m}^{-3}$ .

A energia liberada na câmara de combustão foi determinada pelo produto da carga térmica volumétrica e o volume da câmara de combustão.

A altura da câmara de combustão foi definida em função do volume e do diâmetro da câmara e calculada por meio da Equação 5.

$$h_{cc} = \frac{4 \dot{v}_{cc}}{\pi d_{cc}^2} \quad (5)$$

em que:

$h_{cc}$  = altura da câmara de combustão, m;

$d_{cc}$  = diâmetro da câmara de combustão, m.

De posse da taxa de combustão, dimensionou-se a grelha, de acordo com os passos descritos a seguir:

Adotou-se, neste projeto, o valor de  $150 \text{ kg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  para a taxa de carregamento. Por meio da Equação 6, determinou-se a área total da grelha.

$$S_t = \frac{\dot{m}_{cb}}{N_c} \quad (6)$$

em que:

$N_c$  = taxa de carregamento ou de combustão,  $\text{kg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ;

$S_t$  = área total da grelha,  $\text{m}^2$ .

A taxa de carregamento depende de vários fatores, principalmente do tipo de grelha, tipo de combustível e tiragem dos gases de combustão. Sua determinação é feita experimentalmente ou conhecida por meio de instalações existentes. O dimensionamento da grelha com base no consumo de ar necessário à combustão de  $1,0 \text{ kg}$  de combustível, considerando o escoamento do ar, com certa velocidade, pelos interstícios da grelha (Equação 7).

$$S_1 = \frac{\dot{m}_{cb} V_{ar}^t}{v \cdot 3600} \quad (7)$$

em que:

$S_1$  = superfície livre da grelha, isto é, seção total de todos os espaços entre as barras que compõem a grelha,  $\text{m}^2$ ;

$V_{ar}^t$  = volume teórico de ar necessário à queima de  $1 \text{ kg}$  de combustível,  $\text{m}^3$ ; e

V = velocidade de escoamento do ar,  $\text{m s}^{-1}$ .

A velocidade v varia de  $0,8$  a  $2,0 \text{ m s}^{-1}$  para fornalhas com tiragem natural e de  $2$  a  $4 \text{ m s}^{-1}$  para tiragem mecânica. Para o cálculo da superfície total,  $S_t$ , da grelha, utiliza-se a Equação 8, na qual m varia de  $1/4$  a  $1/2$  para carvão e  $1/7$  a  $1/5$  para madeira. Adotaram-se para este projeto os valores de  $v = 0,8 \text{ m s}^{-1}$  e  $m = 1/7$ , e pela Equação 8, determinou-se a superfície livre da grelha.

$$m = \frac{S_1}{S_t} \quad (8)$$

A determinação da tensão térmica da superfície da grelha se faz de acordo com a Equação 9 (VAN WYLEN et al., 2003).

$$Q_A = \frac{\dot{m}_{cb} \text{ PCI}}{S_t} \quad (9)$$

em que:

$Q_A$  = tensão térmica da superfície da grelha,  $\text{kW m}^{-2}$ .

#### Construção da fornalha para biomassa

A fornalha foi construída em formato cilíndrico (câmara de combustão e trocador de calor), porque a dilatação térmica e a intensidade de calor que atinge as paredes são simétricas para este formato, contribuindo para a distribuição uniforme do calor gerado na combustão em todo o trocador de calor.

A fornalha foi construída por etapas. Fazem parte dela: base; cinzeiro; grelha plana e inclinada; câmara

de combustão, em chapa metálica; depósito de combustível; rosca sem fim; ciclone, ventilador centrífugo e chaminé.

A primeira etapa constituiu-se da construção da base da fornalha, em forma circular, feita com tijolos de barro, com diâmetro de 1,32 m (Figura 1).

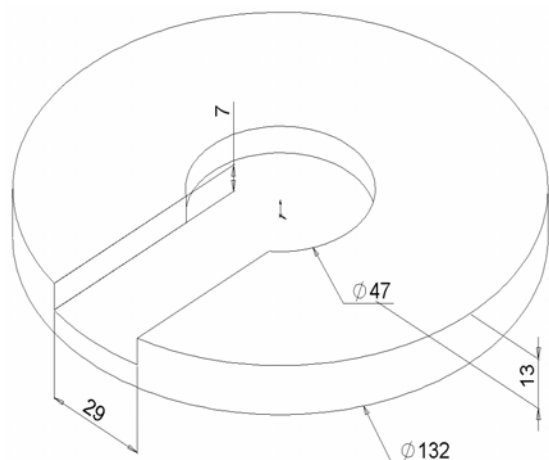


Figura 1. Dimensões da base da fornalha (unidades em m).

A partir da base construiu-se o cinzeiro, com diâmetro de 0,47 m, destinado ao recebimento das cinzas provenientes da combustão, as quais, por gravidade, serão depositadas nele e recolhidas por uma abertura com dimensões de 0,40 x 0,29 m. Levantou-se meia parede de tijolo com o diâmetro do cinzeiro e fez-se um cinturão com diâmetro interno de 0,54 m e externo de 0,82 m. Colocou-se areia, objetivando evitar a saída dos gases para o ambiente externo da câmara (Figura 2a).

A grelha plana foi colocada na câmara interna, onde as cinzas passarão por suas frestas e serão depositadas no cinzeiro. Em cima da grelha plana, foi colocada uma grelha inclinada de 45°, onde o combustível fino era lançado, deslizando até a chama-piloto, e ocorria, neste percurso, a sua combustão (Figura 2b).

A construção da câmara de combustão foi feita à parte. Destinada à queima de combustível, foi confeccionada em forma circular, utilizando-se chapas de aço de 0,012 m, tendo diâmetro de 0,64 m. A altura da câmara de combustão caracterizou-se também como a altura do início das aletas formadoras de uma chicana interna por onde fluem os gases de combustão, com o intuito de reduzir a velocidade do escoamento destes gases, melhorando a troca térmica, constituindo um trocador de calor.

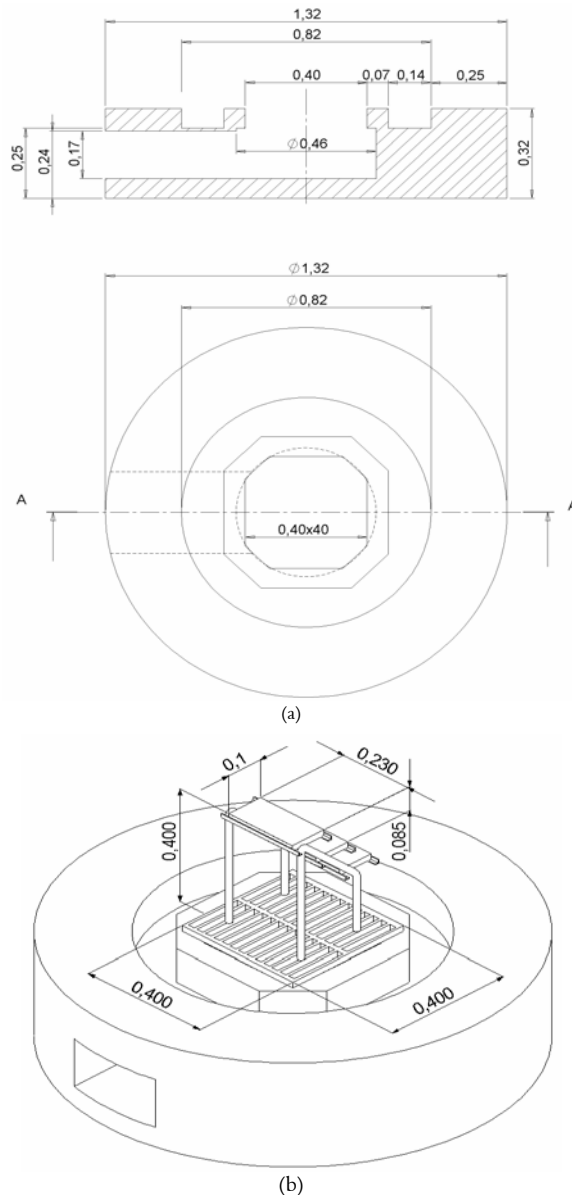
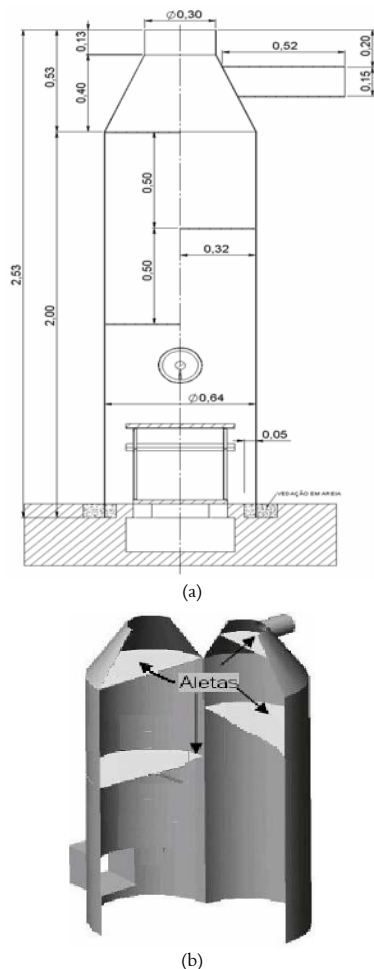


Figura 2. Dimensões: (a) cinzeiro; (b) posicionamento das grelhas plana e inclinada (unidades em m).

Depois de fixada a última aleta, foi feito um cone com duas saídas de ar, uma ligada à chaminé e a outra ligada à caixa de aquisição de ar aquecido. Estas saídas possibilitaram a escolha da forma de funcionamento da fornalha, ou seja, com aquecimento direto ou indireto do ar (Figura 3).

Após fixação da câmara de combustão ao cinturão de areia, deixou-se um vão de 0,15 m entre a câmara de combustão e a parede externa da fornalha, de forma que o ar frio que entrasse pelos orifícios fixados na lateral direita da fornalha escoasse sobre a superfície aquecida da câmara de combustão, aquecendo-se por trocas térmicas e saindo pela lateral esquerda da fornalha; daí era direcionado para

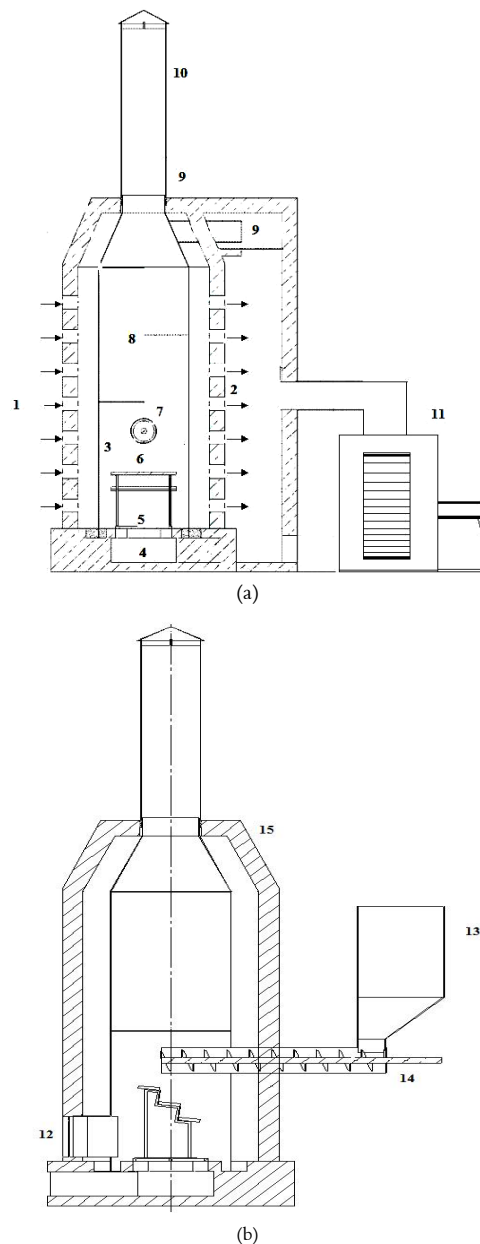
uma caixa coletora feita de alvenaria, que foi ligada a um ventilador centrífugo de pás retas, com vazão de  $82,81 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ , por um tubo de aço de  $0,25 \text{ m}$  de diâmetro, isolado com lã de vidro e papel laminado, a fim de reduzir perdas de calor. O ventilador foi acoplado ao eixo de um motor elétrico trifásico, marca WEG, com potência nominal de  $3,73 \text{ kW}$  ( $5 \text{ cv}$ ) e  $1.750 \text{ rpm}$ , com rendimento nominal e fator de potência a plena carga de  $84,6\%$  e  $0,83$ , que sugava o ar aquecido e o direcionava para o secador (Figura 4a).



**Figura 3.** (a) Corte e dimensões do cilindro metálico compreendendo a câmara de combustão, o trocador de calor, com detalhamento das aletas e das saídas de ar, de acordo com o funcionamento da fornalha (cotas em m); e (b) detalhe do posicionamento das aletas.

A alimentação da fornalha com lenha foi feita manualmente pela frente; na parte de trás, adaptou-se um depósito para combustível particulado fino. Para se fazer o lançamento do combustível particulado fino, na câmara de combustão, foi utilizado um transportador helicoidal com diâmetro de  $0,15 \text{ m}$ , acoplado ao reservatório, que lança o combustível na parte superior da grelha secundária

(interior da câmara de combustão). A essa rosca, acoplou-se um motor, necessário para reduzir a velocidade, para que fornecesse combustível na quantidade adequada. Na Figura 4b são apresentados os detalhes da alimentação da fornalha.



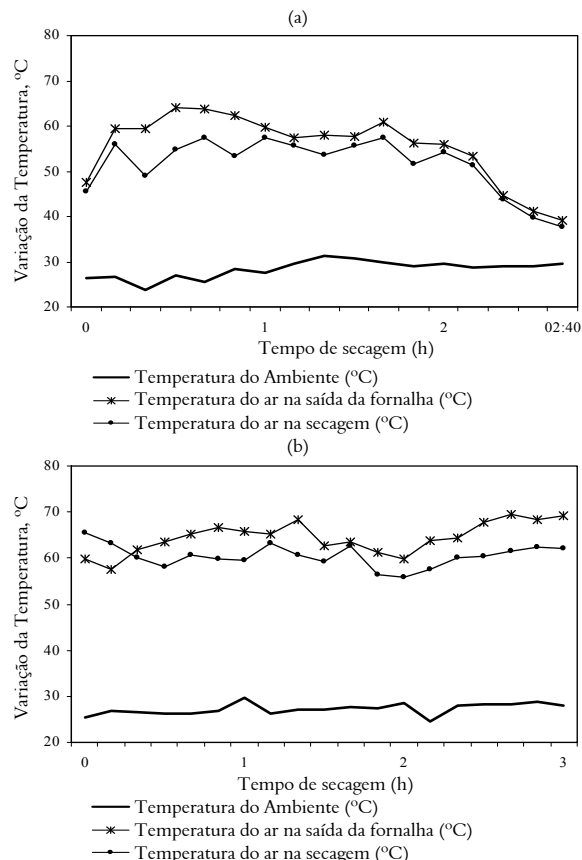
**Figura 4.** Detalhes da fornalha: (a) entradas e saídas de ar; e (b) sistemas de alimentação; 1 – Entradas de ar ambiente; 2 – Saídas de ar aquecido para a caixa de aquisição de ar aquecido; 3 – Câmara de combustão; 4 – Cinzeiro; 5 – Grelha plana; 6 – Grelha inclinada de  $45^\circ$ ; 7 – Entrada da biomassa particulada fina na câmara de combustão; 8 – Aletas; 9 – Saída de ar aquecido para a chaminé (fogo indireto) e para a caixa de aquisição de ar aquecido (fogo direto); 10 – Chaminé; e 11 – Ventilador; 12 – Porta para alimentação da fornalha com lenha; 13 – Depósito de biomassa particulada fina; 14 – Transportador helicoidal para alimentação da fornalha com biomassa particulada fina; e 15 – Parede externa de alvenaria da fornalha.

## Resultados e discussão

### Fornalha na opção de aquecimento indireto associando palha de café com lenha

#### Varição das temperaturas do ar aquecido em função do tempo de funcionamento da fornalha

Nas Figuras 5a e b estão apresentadas as variações de temperatura do ar ambiente, do ar na saída da fornalha e do ar de secagem (depois do ventilador) em função do tempo de funcionamento da fornalha.



**Figura 5.** Variação da temperatura do ar em função do tempo de funcionamento da fornalha, utilizando palha de café associada com lenha: (a) teste 1; e (b) teste 2.

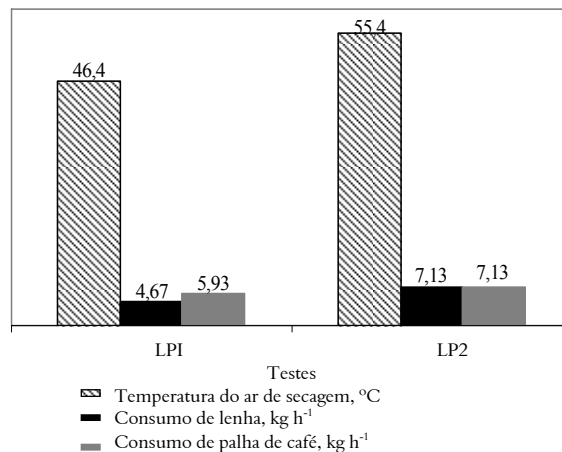
Observa-se, nas Figuras 5a e b, nos testes em que associou a palha de café com a lenha, acentuada variação de temperatura do ar aquecido. Esse comportamento se deve à taxa de liberação de energia na câmara de combustão e, também, ao acúmulo de palha que não queimava totalmente em suspensão. Esse acúmulo de palha na grelha e ao seu redor dificultava a passagem de ar comburente interferindo na cinética das reações químicas de combustão.

#### Varição do consumo de combustível em função da temperatura do ar de secagem

O consumo de combustível varia com a quantidade de energia que a fornalha deve liberar

para elevar a temperatura do ar ambiente e do volume de ar a ser aquecido. Na Figura 6, é apresentado o consumo de combustível em função da temperatura média do ar de secagem durante o funcionamento da fornalha para uma vazão de  $82,81 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ .

Nos testes LP1 e LP2 (Figura 6), o consumo de lenha foi, aproximadamente, igual ao consumo de palha de café no teste LP1 e igual no teste LP2. No teste LP1, ocorreu maior acúmulo de palha na grelha e ao seu redor, dificultando a passagem de ar comburente interferindo na combustão.



**Figura 6.** Consumo de combustível em função da temperatura do ar de secagem utilizando a palha de café em associação com a lenha.

#### Varição da eficiência do sistema de aquecimento de ar em função da temperatura do ar de secagem

No aquecimento indireto do ar, associando lenha à palha de café, as eficiências térmicas do sistema encontradas foram de 59,8 e 65,9% para os testes LP1 e LP2, respectivamente. As eficiências obtidas nos testes foram consideradas satisfatórias, com valores superiores aos citados na literatura para este tipo de aquecimento de ar.

#### Fornalha na opção de aquecimento direto associando moinha de carvão com lenha

#### Varição das temperaturas do ar aquecido em função do tempo de funcionamento da fornalha

Na Tabela 1, são apresentados o resumo dos dados da vazão de ar aquecido e os valores médios de temperaturas do ar medidas para o regime permanente de funcionamento dos dois testes com a moinha de carvão associada com a lenha e para o único teste utilizando lenha.

Observaram-se pequenas variações de temperatura, decorrentes do suprimento de lenha, já que o suprimento de moinha de carvão era feito mecanicamente e de forma contínua. O suprimento de lenha foi descontínuo e irregular, fazendo com

que a taxa de liberação de energia não fosse constante. Nas fornalhas que utilizam lenha, em razão da natureza do combustível, a combustão é irregular e ocorre em várias etapas, passando pela secagem da madeira até chegar à combustão do carbono fixo, o que acarreta oscilações de temperatura na câmara de combustão e no ar de secagem.

**Tabela 1.** Fluxo de ar e temperaturas médias do ar durante os testes.

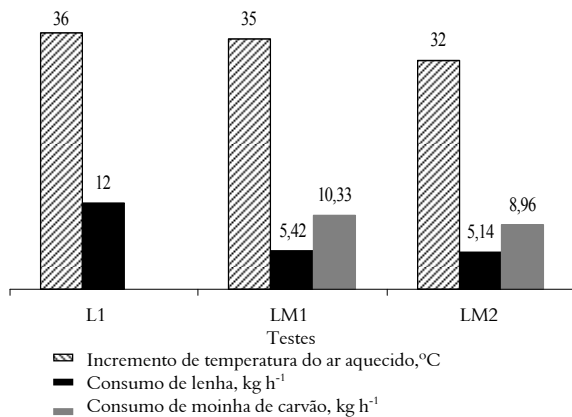
Testes	Fluxo de ar aquecido (m <sup>3</sup> min. <sup>-1</sup> )	Temperatura do ar ambiente (°C)	Temperatura do ar* (°C)	Temperatura do ar ** (°C)
LM1		28,0 ± 2,6	62,9 ± 4,1	60,1 ± 4,2
LM2	82,8	32,2 ± 2,4	64,3 ± 4,5	61,9 ± 4,5
L1		28,1 ± 1,6	64,3 ± 3,3	61,3 ± 3,0

\*Ponto de medição na saída da fornalha; \*\*Ponto de medição depois do ventilador.

### Consumo de lenha e de moinha de carvão em função do incremento de temperatura no ar aquecido

O consumo de combustível varia com a quantidade de energia que a fornalha deve liberar para elevar a temperatura do ar ambiente e o volume de ar a ser aquecido. Na Figura 7, são apresentados os consumos de combustível, em função do incremento de temperatura no ar de secagem durante o funcionamento da fornalha, para uma vazão de 82,81 m<sup>3</sup> min.<sup>-1</sup>.

Estudos mostram, para uma mesma vazão, que o consumo de combustível aumenta com a temperatura do ar, pela maior quantidade de energia que a fornalha deve liberar para elevar a temperatura do ar. Observa-se, na Figura 1, teste L1, o qual utilizou somente lenha, que o consumo de combustível total (12 kg h<sup>-1</sup>) foi inferior aos testes com associação de moinha de carvão e lenha, (15,75 e 14,10 kg h<sup>-1</sup>, respectivamente). Com a associação da moinha de carvão à lenha, houve redução considerável no consumo de lenha. No cômputo final da secagem, esta redução pode ser muito viável, uma vez que o preço da lenha é superior ao da moinha de carvão.



**Figura 7.** Consumo de lenha e de moinha de carvão em função do incremento de temperatura no ar aquecido.

### Varição da eficiência do sistema de aquecimento de ar em função da temperatura do ar aquecido

A eficiência térmica do sistema, no aquecimento direto do ar, para os testes L1, utilizando somente a lenha, foi de 86,5%. Já nos testes LM1 e LM2, as eficiências térmicas foram de 80,7 e 77,4%, respectivamente. As eficiências obtidas nos testes foram consideradas satisfatórias, com valores superiores aos citados na literatura, sendo utilizados combustíveis alternativos, desperdiçados na maioria dos casos. Independentemente do combustível utilizado, a fornalha avaliada apresentou desempenho satisfatório, mostrou-se eficiente e é uma ótima alternativa na redução dos gastos com lenha.

### Conclusão

Tanto na opção de aquecimento direto quanto na opção de aquecimento indireto do ar na fornalha, observou-se que:

- a temperatura do ar de secagem variou em função da taxa de liberação de energia na câmara de combustão;
- sob o ponto de vista do controle da combustão pela temperatura do ar de secagem, pode-se afirmar que a fornalha propicia condições adequadas para as reações de combustão;
- a configuração da fornalha possibilitou bom isolamento térmico, pelo aproveitamento da energia radiada pelas chamas, que aquecem a estrutura metálica. Há, assim, a troca térmica com o ar frio, resultando em perda mínima da energia fornecida.

### Referências

- SILVA, J. S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. In: SILVA, J. S. (Ed.). **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, 2001. p. 395-461.
- SORDI, A.; SOUSA, S. N. M.; OLIVEIRA, F. H. Biomassa gerada a partir da produção avícola na região Oeste do Estado do Paraná: uma fonte de energia. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 27, n. 2, p. 183-190, 2005.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNACKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. 6. ed. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda, 2003.
- VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: UFPR, 2001.

Received on March 29, 2008.

Accepted on October 23, 2008.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.