

ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UMA FORNALHA A CARVÃO VEGETAL PARA SECAGEM DE CAFÉ DESPOLPADO/DESCASCADO

Iracema Duval da Silva¹ e Jadir Nogueira da Silva²

RESUMO

Fatores como pré-processamento e secagem, influem diretamente na qualidade final do café. Sabe-se que os grãos de café despulpado/descascado geralmente originam um produto final de bebida suave, que alcança preços elevados no mercado porém, durante o processo de secagem, esses grãos são mais susceptíveis aos danos causados pelos fatores temperatura, tempo de exposição e qualidade do ar de secagem. Este trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, Viçosa, MG. Realizaram-se três testes com três repetições, nos quais foram utilizadas aberturas diferentes do topo da fornalha e o combustível usado foi carvão vegetal, proveniente de madeira de eucalipto. O ar de secagem foi mantido a temperatura de 51°C; foram determinadas a temperatura do ar ambiente, a temperatura e a pressão do ar de secagem e o consumo de combustível, em intervalos regulares, para cada teste. A eficiência energética foi determinada pela razão entre a energia recebida pelo ar de secagem e a energia liberada pelo combustível. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que a maior média de eficiência energética sucedeu com a maior média da vazão de secagem e com a menor média de consumo de carvão vegetal. Após se projetar, construir e testar o sistema, foi possível seu redimensionamento, por meio da determinação de parâmetros, como taxa de liberação de energia (K) e taxa de combustão (N_c) mais adequados para o dimensionamento de fornalhas a carvão vegetal. Verificou-se, portanto, a viabilidade da utilização deste sistema para secagem de grãos e café despulpado ou descascado, em particular devido ao fato de gerar energia limpa com significativa eficiência.

Palavras-chave: fornalha, secagem, carvão vegetal

DESIGN, CONSTRUCTION AND TEST OF A CHARCOAL FURNACE FOR DRYING OF COFFEE WITHOUT PULP/HULL

ABSTRACT

Factors like preprocessing and drying affect directly the final quality of coffee. It is well known that coffee grains without pulp/hull generally result in a final product that gives a smoother taste and reach high market prices. On the other hand, during the drying process, these grains are more susceptible to the injuries caused by factors such as temperature, exposure time and air-drying quality. This research was carried out in the Department of Agricultural Engineering of the Federal University of Viçosa, MG, Brazil. Three tests with three replicates were conducted using different openings in the upper part of furnace. The charcoal from eucalyptus wood was used as fuel. The drying air was kept at 51°C temperature. The environmental air temperature, the drying-air pressure, and the fuel consumption were determined, at regular intervals, for each test. The energy efficiency was determined

¹ Engenheira Agrícola, M.Sc. Rua Sarandi 55, 93.700-000, Campo Bom, RS. Tel. (051) 715 3336

² Prof. Titular, Ph.D., Depto Engenharia Agrícola, UFV, 36.571-000, Viçosa, MG. Tel. (031) 899 2729, Fax (031) 899 2735.
E-mail: Jadir@mail.ufv.br

by the ratio between the energy received by the drying air and that delivered from fuel. Based on the results, it was verified that the highest energy efficiency average occurred with the highest average of the air-drying flow rate and with the lowest charcoal consumption average. After projecting, building and testing the furnace, its redesign was possible by determination of the parameters such as the energy delivery rate (K) and combustion rate (N_c), which are more adequate. Thus, viability of this system for drying of coffee grains without pulp/hull was shown particularly because it generates pollution free energy with significant efficiency.

Key words: furnace, drying, charcoal

INTRODUÇÃO

Na safra de 1995, a produção brasileira de grãos de café foi estimada em 2,6 milhões de toneladas, liderando a produção mundial com participação superior a 20% do total produzido. No Brasil, o Estado de Minas Gerais destacou-se como maior produtor, contribuindo com cerca de 48% do total (IBGE, 1995). De acordo com a Federação Brasileira dos Exportadores de Café - ABECAFÉ, até outubro de 1997 o Brasil exportou 2,3 bilhões de dólares, um aumento de 80% em relação a igual período de 1996 (Café, 1998). O preço atual do café, cerca de R\$ 240,00 a saca de café fino, vem despertando o interesse dos produtores no que se refere a alternativas que possibilitem uma melhoria na qualidade do café produzido.

Para o aquecimento do ar utilizado na secagem de produtos agrícolas, normalmente são utilizados dispositivos denominados fornalha. As fornalhas desenvolvidas até o momento apresentam algumas características em comum: as fornalhas de fogo indireto produzem ar quente, próprio para secagem de sementes e frutos, porém apresentam baixo rendimento térmico e, muitas vezes, causam dano térmico nas grelhas e nos trocadores de calor, enquanto as de fogo direto, de construção mais fácil e mais eficientes, apresentam a desvantagem de gerar energia com fumaça, que pode contaminar os grãos, inviabilizando sua comercialização.

O combustível mais empregado é a lenha. Experimentalmente, é conhecida a viabilidade do emprego do carvão vegetal como fonte de energia limpa, porém não foram encontrados, na literatura consultada, estudos sobre o uso do carvão vegetal como fonte de energia para o aquecimento do ar na secagem de produtos agrícolas nem sobre a possível melhoria na qualidade final do café, que seu uso possa permitir. Em geral, o carvão vegetal, proveniente da carbonização de eucalipto, é livre de alcatrão, óleos e água presentes na madeira original, responsáveis pela formação da fumaça densa e contaminante. Por este motivo, estudou-se o comportamento desse combustível, para viabilizar sua utilização na obtenção de cafés finos e de sementes de qualidade.

O tamanho e a forma da fornalha dependem do tipo de combustível, do dispositivo usado para queimá-lo e da quantidade de calor que deve ser liberada num intervalo de tempo.

O volume da fornalha depende da taxa de liberação de calor, que é função do tipo de fornalha, das características da chama, do excesso de ar e da turbulência. Segundo Andrade et al. (1985) a taxa de liberação de calor varia entre 100.000 a 500.000 kcal.h⁻¹.m⁻³ (120 a 580 kJ.s⁻¹.m⁻³). Oliveira Filho (1987) cita valores para a taxa de liberação de calor de 175 a 233 kJ.s⁻¹.m⁻³, para diversos combustíveis, incluindo o carvão vegetal, enquanto Silva et al. (1991) encontraram valores para lenha entre 177 e 278 kJ.s⁻¹.m⁻³.

O objetivo deste trabalho foi projetar, construir e testar uma fornalha de fluxo descendente que utilizasse carvão vegetal como combustível, para uso como fonte de calor nos secadores tradicionais e determinar a eficiência energética da fornalha proposta, além de compará-la com valores encontrados na literatura para outros tipos de fornalha, com diferentes combustíveis.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Setor de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas – Departamento de Engenharia Agrícola e no Laboratório de Painéis e Energia – Departamento de Engenharia Florestal. Foi projetada, construída e testada uma fornalha de aquecimento direto e fluxo descendente, utilizando-se como combustível carvão vegetal.

Projeto e cálculos da fornalha

- Cálculos para o ar de secagem

Conhecendo-se a massa específica média do ar de secagem (ρ_{mar}) entre 20 e 50°C, pode-se calcular sua vazão mássica (\dot{m}_{ar}). Para tal, estabeleceu-se a variação de temperatura máxima (ΔT) entre o ar de entrada e de saída da fornalha e a vazão volumétrica (\dot{V}_{ar}).

Com os valores especificados acima, pôde-se calcular o calor necessário para aquecer o ar em ΔT e a taxa de combustível a ser consumido pela fornalha, supondo-se processo em regime permanente, usando-se as equações abaixo:

$$\dot{Q}_{ar} = \dot{m}_{ar} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{Q}_{ar}}{\eta \cdot PCI} \quad (2)$$

- Volume da câmara de combustão (V_c)

O volume da câmara de combustão foi calculado em função da taxa de liberação de energia (K) pois o volume de gás proveniente da combustão está relacionado com a quantidade de energia liberada durante a combustão; adotou-se um valor médio (204kJ.s⁻¹.m⁻³) dentro da faixa recomendada pela literatura consultada.

Segundo Andrade et al. (1985) o volume da câmara de combustão (V_c) pode ser calculado por meio da equação:

$$V_c = \frac{\dot{m}_c \cdot PCI}{K} \quad (3)$$

- Superfície da grelha (S_g)

A superfície da grelha foi determinada por dois métodos:

1º) em função da taxa de combustão considerada para fins de projeto igual a $110 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$:

$$S_g = \frac{\dot{m}_c}{\left(\frac{N_c}{3600}\right)} \quad (4)$$

2º) por meio do cálculo do consumo de ar necessário para queimar 1kg de combustível sólido, considerando-se carga manual e usando-se os dados fornecidos por Matos et al. (1981) para a composição química do carvão vegetal ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de combustível) produzido a 400°C :

$$V_{ar}^t = \frac{1,3,32}{0,232 \cdot 1,251} \left(\frac{P_c}{12} + \frac{P_{H_2}}{4} + \frac{P_s}{32} - \frac{P_{O_2}}{32} \right) \quad (5)$$

O cálculo da superfície da grelha pôde ser feito por meio da equação:

$$S_g = \frac{\dot{m}_c \cdot V_{ar}^t}{0,2 \cdot V} \quad (6)$$

Neste trabalho, adotou-se a média dos valores calculados usando-se as metodologias propostas neste item para o valor da superfície da grelha.

- Cálculos para os gases de combustão

O volume real dos gases de exaustão é a soma do volume teórico necessário de ar e o volume teórico dos gases originados na combustão, considerando-se o excesso de ar. Esses volumes foram calculados em condições normais, isto é, a 0°C e pressão atmosférica (CETEC, 1988).

$$V_{ar}^t = \frac{1,01 \cdot P_{Cl}}{1000} + 0,5 \quad (7)$$

$$V_g^t = \frac{0,89 \cdot P_{Cl}}{1000} + 1,65 \quad (8)$$

$$V_g^r = V_g^t + (m-1) \cdot V_{ar}^t \quad (9)$$

Determinou-se o volume real de gases na temperatura média de operação \bar{V}_g^r , utilizando-se a média das temperaturas de ignição do carvão vegetal que, segundo Oliveira Filho (1987) é de 400°C , e de saída do ar de secagem.

$$\bar{V}_g^r = V_g^r \left(\frac{273,15 + \bar{t}}{273,15} \right) \quad (10)$$

Ao se conhecer o volume real dos gases e a massa específica dos gases na temperatura de operação, pôde-se determinar as vazões volumétrica e mássica, conforme as equações a seguir:

$$\dot{Q}_g = \bar{V}_g^r \cdot \dot{m}_c \quad (11)$$

$$\dot{m}_g = \dot{Q}_g \cdot \rho_{mg} \quad (12)$$

- Eficiência energética da fornalha

Com base nos valores indicados pela literatura consultada, estimou-se uma eficiência energética média de 50%.

- Cálculo das perdas de calor da fornalha para o ambiente

Considerando-se desprezíveis as perdas de calor por condução e convecção, a taxa de calor transferido da câmara de combustão para as vizinhanças (q) foi estimada por meio da seguinte equação:

$$q = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (13)$$

Comparou-se este valor com a taxa de energia liberada pelo combustível (Q_{comb}) usando-se a equação:

$$Q_{comb} = \dot{m}_c \cdot PCI \quad (14)$$

Alguns aspectos relacionados à construção da fornalha

A fornalha é constituída por uma câmara de combustão primária, que possui uma abertura na parte superior para alimentação do combustível e de uma câmara de combustão secundária, com a finalidade de completar a combustão dos gases produzidos no processo e promover a mistura de ar ambiente e os gases originados na combustão. A câmara de combustão tem uma parede interna de tijolos refratários e uma externa de tijolos de barro (lajotas). Para o assentamento dos tijolos utilizou-se o seguinte traço: $0,018\text{m}^3$ de areia, $0,018\text{m}^3$ de terra de barranco e $0,002\text{m}^3$ de melaço, (Silva, 1982). Para a argamassa de revestimento o traço foi $0,018\text{m}^3$ de areia, $0,018\text{m}^3$ de terra de barranco e 2 litros de cimento. A adição de melaço foi feita para permitir a dilatação, com a função de evitar trincas quando a fornalha estivesse em operação.

Na fornalha, a grelha está localizada no local de temperatura mais elevada; para evitar sua fusão, foi utilizado o sistema de grelha refrigerada, onde o ar ambiente é forçado a passar no interior dos tubos. A grelha é composta de tubos metálicos sem costura, de 2 polegadas (50,8mm) de diâmetro interno e 3mm de espessura, espaçados de 25mm.

Com a finalidade de estreitar a passagem do ar ambiente e forçá-lo a fluir através de uma camada incandescente de carvão vegetal, sobre a grelha foi disposto um tronco de cone feito de concreto refratário aluminoso (CASTIBAR 160). Sob a grelha foi instalado um cinzeiro, em toda a sua extensão, com o objetivo de se recolher as cinzas e o combustível não queimado.

Foram utilizados um ciclone metálico e um ventilador centrífugo com rotor de 400mm de diâmetro conectando-se, ao ventilador, um motor de indução trifásico, 220/380V, e 2cv de potência a 1720rpm.

Operação da fornalha e medições

A fornalha foi posta em funcionamento para a obtenção de dados sobre seu desempenho e os valores obtidos foram comparados com os de projeto.

Foram efetuados nove testes com duração média de oito horas cada um. Utilizaram-se três aberturas diferentes para a tampa superior da câmara de combustão: $0,60 \times 0,60\text{m}$ (Tratamento 1), $0,60 \times 0,40\text{m}$ (Tratamento 2) e $0,60 \times 0,20\text{m}$ (Tratamento 3). Foram feitas três repetições de cada tratamento.

Aplicou-se o teste de Duncan para a média das eficiências energéticas obtidas nos três tratamentos, a nível de 5% de probabilidade.

A alimentação de combustível durante os testes foi manual e sempre que se observava a redução da temperatura preestabelecida do ar de secagem, 50°C ; em intervalos regulares de uma hora, verificava-se a massa de carvão vegetal consumida, por meio de uma balança, marca Filizola, modelo 160, com precisão de $\pm 50\text{g}$.

Para a determinação do teor de umidade do combustível foi usada uma estufa de secagem e esterilização, modelo 315 SE.

Após a verificação de estabilização da temperatura do ar de secagem em 50°C , cerca de 20 minutos depois do início do

teste, as temperaturas eram monitoradas e registradas ao longo de todo o sistema, o qual foi instrumentado com a finalidade de medir as temperaturas e as pressões estática e dinâmica.

Sistemas de medições

Utilizaram-se dois termopares de cromel-alumel, para medição de altas temperaturas (até 1000°C) e sete de cobre-constantan, para temperaturas entre 20 e 250°C. As posições dos termopares são mostradas na Figura 1. Foram determinadas as temperaturas nas câmaras de combustão primária e secundária, na entrada e saída do ciclone e na tubulação de saída. Para o ar de saída da tubulação e o ar ambiente foram determinadas as temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco.

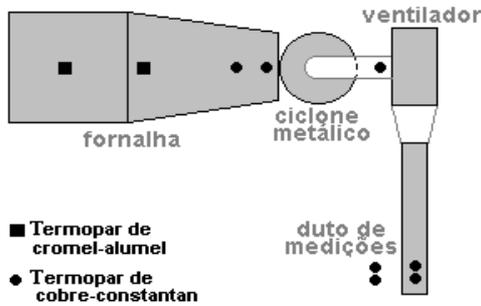


Figura 1. Esquema de montagem para testes e posição dos termopares

Os termopares foram conectados a um Sistema de Aquisição de Dados para o registro das temperaturas, em intervalo de 300 segundos. Utilizou-se um psicrômetro para se determinar as temperaturas de bulbos úmido e seco do ar ambiente, em intervalo de 1 hora e um tubo de Pitot conectado a um manômetro inclinado, para a medições das pressão total e dinâmica.

A medição da velocidade do ar foi feita indiretamente, conforme recomendações da ASHRAE (1982) por meio da pressão dinâmica, determinada em 20 pontos da mesma seção transversal de uma tubulação redonda montada para esta finalidade. Para o cálculo da velocidade do ar de secagem utilizou-se a metodologia proposta pela NAFM (1952) - National Association of Fan Manufacturers, visando corrigir as pressões total e dinâmica determinadas.

A pressão total foi corrigida através das equações 15 a 17, abaixo:

$$K_1 = \left(\frac{d\alpha}{dp} \right) \tag{15}$$

As perdas de carga no duto (P_f) e na transição (P_c) foram calculadas por meio das equações que seguem, segundo NAFM (1952):

$$P_f = 0,02.L \cdot \frac{PV}{D_o} \tag{16}$$

$$P_c = 0,03.PV \tag{17}$$

Para a correção da pressão dinâmica utilizou-se a equação:

$$PV_c = K_1 PV \tag{18}$$

A seguir, tem-se as equações propostas por Macintyre (1988) para o cálculo da velocidade ($m.s^{-1}$) dos gases no duto de medições:

$$V_s = 4,0339 \cdot \sqrt{\frac{PV_c}{d}} \tag{19}$$

$$d = \frac{492,0839}{(460 + T)} \tag{20}$$

Desenhos da fornalha

Com base na metodologia adotada para o dimensionamento da fornalha, descrito anteriormente no item projeto e cálculo da fornalha, as Figuras 2 a 4 apresentam as dimensões determinadas.

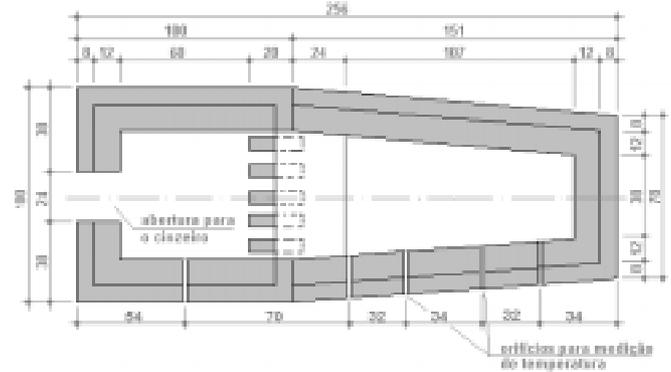


Figura 2. Planta baixa da fornalha proposta

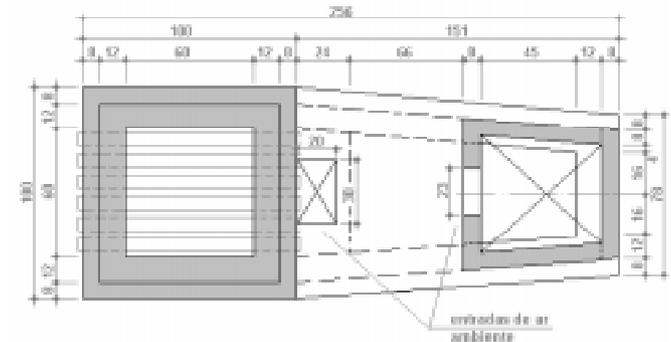


Figura 3. Vista superior da fornalha proposta



Figura 4. Cortes longitudinal e transversal da fornalha

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 1 e 2 mostram os dados obtidos no experimento e os parâmetros calculados para cada teste, com a finalidade de determinar a eficiência energética obtida em cada teste. Algumas observações podem ser feitas por meio da análise dessas tabelas:

- a vazão de ar de $5160 m^3.h^{-1}$ ($1,43 m^3.s^{-1}$) adotada para o projeto da fornalha (descrito anteriormente) foi superestimada quando comparada ao valor obtido por meio da medição da pressão dinâmica e posterior cálculo da vazão (Tabela 2) que foi, em média, $2817 m^3.h^{-1}$ ($0,78 m^3.s^{-1}$);

Tabela 1. Dados médios ambientais, do ar de secagem e do combustível, obtidos em cada teste

Tratamentos	Dados Ambientais		Dados Combustível		Dados Ar Secagem			Câmara de Combustão	
	Tbs	UR	\dot{m}_c	PCI	PT	PV	TP5	TP8	TP8 _{máx}
	(°C)	(%)	(kg.h ⁻¹)	(kJ.kg ⁻¹)	(mm.c.a.)	(mm.c.a.)	(°C)	(°C)	(°C)
T 1									
teste 1	28,00	64,0	3,00	30412	9,84	6,31	51,64	178,40	385,72
teste 5	28,38	70,0	3,30	30412	8,45	6,36	51,20	172,73	358,34
teste 10	21,38	95,0	3,64	30412	7,55	6,57	51,01	277,23	496,21
MÉDIA	25,92	76,0	3,31		8,61			209,45	413,42
(s; c.v.)	(± 3,21; 12,4%)	(± 13,4; 17,6%)	(± 0,26; 7,9%)					(± 47,98; 22,9%)	(± 59,60; 14,4%)
T 2									
teste 2	26,50	66,0	2,57	30412	9,39	6,55	50,04	160,14	336,66
teste 7	24,08	90,0	3,19	30412	8,42	6,68	51,45	207,78	332,11
teste 9	26,63	81,0	2,85	30412	8,44	6,78	51,60	250,53	370,78
MÉDIA	25,74	79,0	2,87		8,75			206,15	346,52
(s; c.v.)	(± 1,17; 4,5%)	(± 9,9; 12,5%)	(± 0,25; 8,8%)					(± 36,92; 17,9%)	(± 17,26; 5,0%)
T 3									
teste 3	24,38	88,0	2,89	30412	10,57	6,34	52,25	123,40	297,11
teste 4	23,50	84,0	3,44	30412	8,61	6,02	51,08	183,19	395,36
teste 8	25,50	84,0	3,22	30412	8,00	6,76	51,23	283,90	525,83
MÉDIA	24,46	85,3	3,18		9,06			196,83	406,10
(s; c.v.)	(± 0,82; 3,3%)	(± 1,9; 2,2%)	(± 0,23; 7,1%)					(± 66,23; 33,6%)	(± 93,68; 23,1%)

Tabela 2. Parâmetros para o ar ambiente e o ar de secagem e eficiência energética da fornalha para cada teste

Tratamentos	Parâmetros Ambientais		Parâmetros Para o Ar de Secagem							Eficiência Energia* η (%)	
	ΔT (°C)	h _E (kJ.kg ⁻¹)	PT _c (mm.c.a.)	PV _c (mm.c.a.)	d	V _S (m.s ⁻¹)	Ḃ _{ar} (m ³ .h ⁻¹)	TP5 _c (°C)	ρ _{mar} (kg.m ⁻³)		h _S (kJ.kg ⁻¹)
T 1											
teste 1	23,48	301,35	11,08	6,07	0,8410	10,84	2758,4	51,48	1,1185	324,94	79,97
teste 5	22,75	301,73	9,76	6,11	0,8420	10,87	2766,1	51,13	1,1184	324,59	70,65
teste 10	29,60	294,71	8,94	6,32	0,8430	11,05	2810,6	50,98	1,0811	324,44	81,77
MÉDIA	25,28		9,93	6,17		10,92	2778,4	51,20			77,46 a
(s; c.v.)	(± 3,07; 12,1%)		(± 0,88; 8,9%)	(± 0,11; 1,8%)		(± 0,10; 0,9%)	(± 23,0; 0,8%)	(± 0,21; 0,4%)			(± 4,87; 6,3%)
T 2											
teste 2	23,71	299,84	10,71	6,30	0,8440	11,02	2804,2	50,21	1,1231	323,67	96,27
teste 7	27,25	297,41	10,13	6,42	0,8410	11,14	2834,8	51,33	1,1253	324,79	90,23
teste 9	24,82	299,97	9,37	7,54	0,8420	12,07	3072,3	51,45	1,1208	324,91	99,37
MÉDIA	25,26		10,07	6,75		11,41	2903,8	51,00			95,29 b
(s; c.v.)	(± 1,48; 5,8%)		(± 0,55; 5,4%)	(± 0,56; 8,3%)		(± 0,47; 4,1%)	(± 119,8; 4,1%)	(± 0,55; 1,1%)			(± 3,79; 4,0%)
T 3											
teste 3	27,59	297,71	11,79	6,10	0,8410	10,86	2763,5	51,97	1,1237	325,43	98,15
teste 4	27,54	296,83	9,82	5,79	0,8420	10,58	2692,3	51,04	1,1267	324,50	80,39
teste 8	25,66	298,84	9,43	6,50	0,8425	11,21	2852,1	51,16	1,1232	324,62	84,54
MÉDIA	26,93		10,35	6,13		10,88	2769,3	51,39			87,69 ab
(s; c.v.)	(± 0,90; 3,3%)		(± 1,03; 10,0%)	(± 0,29; 4,7%)		(± 0,26; 2,4%)	(± 65,4; 2,4%)	(± 0,41 0,8%)			(± 7,58; 8,6)

* Nota: Eficiências médias seguidas da mesma letra não se diferenciam, para o teste de Duncan, a nível de 5% de probabilidade

- como a vazão de ar e a variação de temperatura neste projeto apresentaram-se com valores superestimados, poder calorífico inferior e eficiência energética subestimados, a quantidade de combustível necessário para o aquecimento do ar, calculada de $13,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, foi 4,5 vezes o valor daquela efetivamente consumida durante os testes, cerca de $3,12 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ (Tabela 1). Essas diferenças fizeram com que os valores do volume da câmara de combustão e superfície da grelha ficassem superestimados;

- a temperatura média dos gases na câmara de combustão (TP8) reduziu com a diminuição da vazão mássica de combustível (\dot{m}_c)

Utilizando-se a metodologia proposta no item *projeto e cálculo da fornalha*, foi feito o redimensionamento da fornalha a carvão vegetal, com base nos dados obtidos no experimento descrito neste trabalho. A Tabela 3 mostra os parâmetros adotados na fase de projeto e construção da fornalha testada, para o ar de secagem, para o carvão vegetal e para a câmara de combustão e apresenta os parâmetros adotados para a fornalha proposta (redimensionada).

Tabela 3. Parâmetros para o ar de secagem, para o carvão vegetal e para a câmara de combustão, para as fornalhas testada e proposta

Parâmetros	Fornalha Testada		Fornalha Proposta	
	projeto	construção	redimensionada	
V_{ar}	$(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	5160,00	2817,15	2817,15
ΔT	(K)	30,00	25,82	30,00
$\rho_{m_{ar}}$	$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1,146	1,006	1,146
C_p	$(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1,007	1,007	1,007
η	(decimal)	0,50	0,87	0,87
PCI	$(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	26557	30412	30412
m_c	$(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	13,50	3,12	3,70
K	$(\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$	204,00	53,79	230,00
N_c	$(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$	110,00	54,50	55,00
V_c	(m^3)	0,490	0,490	0,140
S_g	(m^2)	0,110	0,060	0,060

Cálculo das perdas de calor da fornalha para o ambiente

O cálculo da perda de calor foi feito empregando-se as Equações 13 e 14, conforme explicado no item *projeto e cálculo da fornalha*.

Para a presente fornalha, pode-se considerar uma perda de calor média de 10% para o ambiente.

CONCLUSÕES

Restringindo-se às condições de estudo em que a fornalha foi analisada e às suas dimensões, o presente estudo permitiu as seguintes conclusões:

1. O uso de parâmetros médios, citados na literatura para fornalhas a lenha, aplicados ao dimensionamento da fornalha a carvão, fez com que as suas dimensões fossem superestimadas.

2. A análise dos resultados obtidos nos testes da fornalha possibilitou a utilização de parâmetros mais adequados ao combustível utilizado, ou seja, carvão vegetal, permitindo o redimensionamento desta, de maneira a se construir uma

fornalha de menores dimensões, conseqüentemente de menor custo.

3. A melhor eficiência energética (95,29%) foi obtida para abertura do topo da fornalha, igual a $0,60 \times 0,40 \text{ m}$.

4. Constatou-se ser viável a utilização dos gases gerados na combustão de carvão vegetal para secagem direta de café despolpado/descascado.

5. A presença de pequenas partículas de carvão no ar de secagem, provavelmente não afeta a qualidade do produto, uma vez que os compostos fenólicos encontrados na madeira foram retirados na carbonização.

6. Testes efetivos da fornalha acoplada a um secador, com posterior análise da qualidade do produto seco, utilizando-se carvão vegetal e lenha como combustíveis, são etapas posteriores que se deverá seguir.

8. Sugere-se trabalho posterior de análise econômica de todo o processo relacionado com a produção e utilização de carvão vegetal na secagem de grãos, a fim de se verificar a viabilidade econômica de seu uso como combustível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, E.B.; SASSERON, J.L.; OLIVEIRA FILHO, D. **Princípios sobre combustíveis, combustão e fornalhas**. Viçosa, MG: UFV, 1985. 40p.
- CAFÉ com boa receita. **Globo Rural**, Rio de Janeiro, v.13, n.14, p.93, jan, 1998.
- CETEC - FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Teoria simplificada da combustão**. Belo Horizonte, MG, 1988. 30p. (Série de publicações técnicas. SPT-017).
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Rio de Janeiro, IBGE 1995. (Mimeogr.).
- MACINTYRE, A.J. **Ventilação industrial e controle da poluição**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. 403p.
- MATOS, M.; ALMEIDA, M.R.; OLIVEIRA, L.T. Características dos produtos da carbonização da madeira. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS (Belo Horizonte) **Gaseificação da madeira e carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1981. p.36-43. (Série de publicações técnicas. SPT-004).
- NAFM - NATIONAL ASSOCIATION OF FAN MANUFACTURERS. **Standards, definitions, terms and tests codes for centrifugal, axial and propeller fans**. 2.ed. Detroit, 1952. 34p. (Bulletin 110).
- OLIVEIRA FILHO, D. **Aquecimento de ar**. Viçosa, MG: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1987. 16p.
- SILVA, J.S. **Adaptação da fornalha de fogo direto descendente, UFV JII, para secagem de cereais**. Viçosa, MG: UFV, 1982. 8p. (Informe Técnico, 28).
- SILVA, J.S.; GOMES, R.A.R.; HARA, T. et al. Estudo de uma fornalha para secagem de grãos com aquecimento direto. **Engenharia na Agricultura. Série Armazenamento**. Viçosa, MG, v.1, n.2, 1991. 15p.

APÊNDICE: LISTA DE SÍMBOLOS

A	= abertura do topo da fornalha, m ²	K ₁	= fator de correção em função da densidade dos fluidos, adimensional
C _p	= calor específico do ar comburente, kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹	L	= soma dos comprimentos do duto e da transição, m
d ^p	= fator de densidade, adimensional	m	= excesso de ar, decimal
da	= densidade padrão do ar ao nível do mar e à temperatura de 21°C (1,2014 kg.m ⁻³)	\dot{m}_{ar}	= vazão mássica de ar, kg.s ⁻¹
Do	= diâmetro do duto de medições, m	\dot{m}_C	= vazão mássica de combustível, kg.s ⁻¹
Dp	= densidade padrão do gás resultante da combustão de carvão, (1,2494 kg.m ⁻³)	\dot{m}_g	= vazão mássica dos gases, kg.s ⁻¹
h _E , h _S	= entalpia do ar de entrada e do ar de saída, respectivamente, kJ.kg ⁻¹	N _c	= taxa de combustão, kg.h ⁻¹ .m ⁻²
K	= taxa de liberação de energia, kJ.s ⁻¹ .m ⁻³	P _C	= perda de carga na transição entre o duto e o ventilador, mmca
		P _C , P _{H2} , P _S , P _{O2}	= pesos de carbono, hidrogênio, enxofre e oxigênio, por unidade de combustível, respectivamente, kg.kg ⁻¹ de combustível