

## CUSTOS DA SECAGEM DE CAFÉ USANDO-SE LENHA E CARVÃO VEGETAL

Reginaldo Rodrigues dos Santos<sup>1</sup>; Adílio Flauzino de Lacerda Filho<sup>2</sup>; Juarez Souza e Silva<sup>3</sup>; Evandro Castro Melo<sup>4</sup>; Sérgio Maurício Lopes Donzeles<sup>5</sup>

### RESUMO

Determinou-se o custo de secagem de café, em dois secadores rotativos (comercial e modificado). Para o aquecimento do ar de secagem no secador rotativo comercial, queimou-se lenha numa fornalha com fogo indireto, enquanto no secador rotativo modificado o ar foi aquecido, queimando-se carvão vegetal numa fornalha com fogo direto. O teor de água inicial do café foi de  $36 \pm 4$  % b.u.. Quando se utilizou o carvão vegetal para aquecimento do ar de secagem, o custo total foi de R\$ 12,57 por saca de 60 quilos de café seco, sendo que quando se usou lenha, o custo foi de R\$ 12,53 por saca. Ao considerar somente o consumo horário de combustível, na secagem realizada no secador rotativo modificado, aquecimento com carvão vegetal, o custo foi de R\$ 4,20 por saca. Por outro lado, na secagem realizada no secador rotativo comercial, usando-se lenha, a operação teve um custo de R\$ 1,52 por saca de café seco. Concluiu-se que, ao aquecer o ar com carvão, considerando-se somente o consumo de combustível, o custo aumenta 176 % em comparação com a operação realizada com lenha. Quando se consideram todos os custos (fixo e variável), estes tornam-se praticamente iguais. A qualidade final do produto seco e beneficiado foi a mesma, nos dois sistemas estudados.

**Palavras-chave:** café, custo de secagem, combustível.

### ABSTRACT

#### Coffee drying cost using firewood and vegetal coal

The cost of coffee drying was determined in two rotary dryers (commercial and modified). For drying air heating in the commercial rotating dryer, firewood was burnt in an indirect fire furnace while in the modified rotary dryer the air was heated by burning charcoal in a direct fire furnace. Initial water content in the coffee was  $36 \pm 4$  % b.u. The total cost for drying air heating was R\$ 12.57 per 60 kg bag of dried coffee when charcoal was used and of R\$ 12.53 per bag when firewood was used. Considering only the hourly fuel consumption when drying was carried out using the modified rotating dryer, charcoal heating, the cost was R\$ 4.20 per bag. However, when drying in the commercial rotating dryer using firewood, the operation had a cost of R\$ 1.52 per bag of dried coffee. It was concluded that, taking into account only fuel consumption, when the air was heated with charcoal, the cost increases 176 %, as compared to the operation using firewood. When all the costs (fixed and variable) are taken into account, they become practically the same. Final quality of the dried and industrialized products was the same, under both systems studied.

**Keywords:** coffee, drying cost, fuel.

<sup>1</sup> Doutorando em Eng. Agrícola, DEA-UFV, 36571-000, Viçosa-MG. Fone: (31) 8619 2203. reginaldosantos@vicosa.ufv.br.

<sup>2</sup> Prof. Adjunto do DEA-UFV, 36570-000, Viçosa-MG. Fone: (31)38991872. E-mail: alacerda@ufv.br.

<sup>3</sup> Prof. Titular Voluntário do DEA-UFV, 36570-000, Viçosa, MG. Fone: (31)3899-1889. E-mail: juarez@ufv.br.

<sup>4</sup> Pro. Adjunto do DEA-UFV, 36570-000, Viçosa, MG. Fone: (31)3899-1873. E-mail: evandro@ufv.br.

<sup>5</sup> Pesquisador, Doutor, EPAMIG, 36570-000, Viçosa, MG. Fone: (31)3899-1817. E-mail: slopes@ufv.br.

## INTRODUÇÃO

A tecnificação da agricultura faz com que a agricultura de subsistência torne-se passado, enquanto a agricultura empresarial se fortalece, dando novos rumos a este segmento econômico. Para Lacerda Filho (1998), a globalização da economia e a atual política de preços imposta aos produtos agrícolas levam os produtores a análises mais detalhadas sobre este sistema de produção. Em um cenário de alto custo de energia e baixo preço dos produtos agrícolas, torna-se indispensável considerar as relações entre o consumo de energia e as qualidades inerentes ao produto, antes e depois do processamento.

A lenha é, provavelmente, o energético mais antigo usado pelo homem e continua tendo grande importância na Matriz Energética Brasileira, participando com cerca de 10% da produção de energia primária. A lenha pode ser de origem nativa ou de reflorestamento, seu poder calorífico inferior médio é de  $17,57 \text{ MJ.kg}^{-1}$ . Ela tem recebido a denominação de energia dos pobres, pois é parte significativa da base energética dos países em desenvolvimento, chegando a representar até 95% da fonte de energia em vários países. Nos países industrializados, a contribuição da lenha chega a um máximo de 4%. A substituição da lenha de mata nativa por lenha de reflorestamento vem crescendo a cada ano, sendo o eucalipto a principal árvore cultivada para este fim.

Cerca de 40% da lenha produzida no Brasil é transformada em carvão vegetal. O setor residencial é o segundo maior consumidor de lenha, cerca de 29%, geralmente destinada a cocção dos alimentos nas regiões rurais. O setor industrial vem, em seguida, com cerca de 23% do consumo.

O uso do carvão vegetal como fonte de energia para secagem de grãos tem sido uma boa alternativa, pois, este possui alto poder calorífico, em comparação com a lenha, além de gerar energia limpa, livre de odores e fumaças. O poder calorífico inferior médio do carvão é de  $30,8 \text{ MJ.kg}^{-1}$ . O teor de material volátil varia de 20 a 35%, o carbono fixo de 65 a 80% e as cinzas (material inorgânico) de 1 a 3% (Almeida, 1983).

Em algumas fazendas de café, têm-se observado fornalhas a lenha com elevado

consumo de combustível, algumas em péssimo estado de conservação, mal dimensionadas, apresentando excessiva perda de calor. A maioria dessas fornalhas não dispõe de mecanismo de controle do processo de combustão, sendo, em geral, operadas inadequadamente (Lopes et al., 2001). Isto faz com que o custo de secagem, considerando apenas o uso do combustível para aquecimento do ar, aumente significativamente.

Silva (1998) testou uma fornalha com aquecimento direto do ar de secagem, utilizando carvão vegetal como fonte de energia e constatou ser viável para secagem do café, uma vez que o ar quente produzido era livre de fumaça e odores. O autor ressaltou, ainda, que a presença de pequenas partículas de carvão no ar de secagem, provavelmente, não afeta a qualidade do produto, visto que os compostos fenólicos encontrados na madeira foram retirados, durante o processo de carbonização da lenha para produção do carvão.

Young & Dickens (1975) afirmaram que poucos esforços foram despendidos para otimizar os processos de secagem, com vistas à conservação de energia ou de capital. Em estudo de avaliação de custo de secagem, em lotes e em fluxos cruzados, estabeleceram vários parâmetros a serem considerados na análise e verificaram que o tempo de secagem é um deles, podendo ser estimado por modelos matemáticos já desenvolvidos.

Há grande divergência entre técnicos da área de secagem quanto à recomendação de uma opção mais econômica para o combustível a ser usado. Muitos produtores e técnicos consideram, apenas, o custo de combustível para a avaliação econômica. No entanto, custos de depreciação, energia elétrica e mão-de-obra devem ser considerados, para se obter uma análise mais completa do processo. Tendo em vista a necessidade de reduzir o custo de produção e que o processo de secagem tem uma grande influência no custo total de produção, este trabalho teve como objetivos avaliar técnica e economicamente a secagem do café, usando lenha (fornalha com fogo indireto) e carvão vegetal (fornalha com fogo direto) como combustível para o aquecimento do ar de secagem em dois secadores rotativos, um comercial e outro com modificações no sistema de distribuição do ar de secagem.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado na Área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Vegetais, do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa, localizado no município de Viçosa, Minas Gerais. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com três testes por tratamento, utilizando-se café (*Coffea arabica* L.) cereja, variedade Catuaí, procedente do município de Araponga, Minas Gerais. A colheita do café foi realizada entre os meses de maio e setembro de 2001, utilizando-se o sistema de derriça sobre pano, quando o teor de água dos frutos estavam entre 50 e 60 % b.u.

Após colhido, o café foi lavado e os frutos com maior massa específica (cereja) foram separados daqueles apresentando menor massa específica (coco). Em todos os testes, objetivou-se manter a temperatura do ar de secagem em  $60 \pm 5$  °C. Para execução do experimento, secou-se o café cereja, utilizando um secador rotativo (original) e outro modificado (objeto do experimento), sendo que o teor inicial de água variou entre 30 e 40 % b.u., até que o teor final de água atingisse um valor entre 11 e 12 % b.u.

O secador rotativo comercial (Figura 1) caracteriza-se como um secador de lotes, com distribuição radial do fluxo de ar. O aquecimento de ar foi feito, indiretamente, por meio de um trocador de calor do tipo tubo-carcaça, projetado para queima de lenha. O equipamento comercial é constituído por vários módulos, conforme a capacidade desejada. Sob condições experimentais, foi utilizado um módulo cuja capacidade estática é de  $1,6 \text{ m}^3$ .

Neste secador, o ar aquecido flui através de um duto condutor até os difusores, os quais são montados, alternando-se uma face com chapas perfuradas e outra com chapas lisas, conforme Figura 1b. O ar quente, ao passar pelos difusores, flui radialmente através da massa de grãos,

acionados entre os difusores de ar e o corpo cilíndrico, antes da exaustão. Este procedimento causa grandes perdas de energia, devido à redução de volume dos frutos de café durante a secagem.

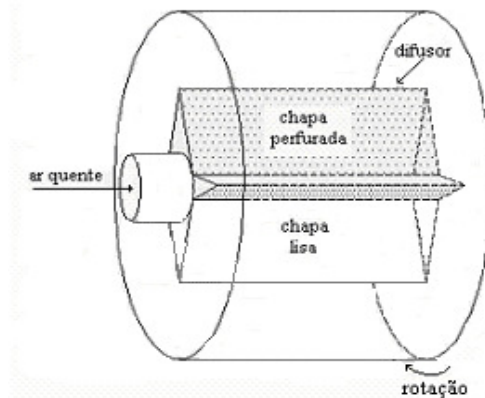
Conforme estabelecido por Silva (2001), as modificações consistiram em, sem alterar as características básicas do secador original, estabelecer um direcionamento para o fluxo do ar de secagem, de forma a otimizar seu aproveitamento, indiferentemente da redução de espessura na camada de produto, durante o processo de secagem. Para tanto, o cilindro rotativo foi dividido em duas partes, considerando-se seu eixo longitudinal. Em uma das partes, foram obstruídas todas as saídas de ar dos difusores e, na outra, os difusores foram construídos com chapas perfuradas, conforme apresentado na Figura 2.

Na Figura 2(a), observa-se que o ar quente, entrando pelo duto central, irá fluir radialmente através da massa de grãos, após passar pelos difusores "A", até atingir o cilindro perfurado "C". Após certo tempo de secagem, por acomodação da massa, ocorrerá uma redução na espessura da camada de grãos na porção superior do cilindro, em relação à porção inferior, devido à redução no volume dos frutos de café, conforme esquematiza a linha de referência de nível do produto. Este comportamento causa uma redução na pressão estática na camada de menor espessura, o que causa maior fluxo de ar nesta região do secador, proporcionando maior demanda de energia, aumento no tempo de operação e, conseqüentemente, maior demanda de mão-de-obra.

Uma chapa metálica lisa foi colocada externamente, cobrindo a metade superior do perímetro do secador (Figura 2(b)) e obstruindo os furos. Buscou-se, com isso, a uniformidade na distribuição do ar de secagem durante todo o processo. Além da modificação na distribuição radial de ar, o sistema de aquecimento foi feito por meio de um combustor com aquecimento direto do ar de secagem, utilizando-se carvão vegetal como combustível (Lopes 2002).



(a)



(b)

**Figura 1.** Secador rotativo comercial

Na Figura 2b, correspondente ao secador modificado, observa-se que os difusores de chapas perfuradas são contínuos, direcionando o fluxo radial do ar de secagem para a porção mediana inferior do secador, impedindo sua fluidez na porção mediana superior, devido à obstrução do fluxo por meio de chapas lisas.

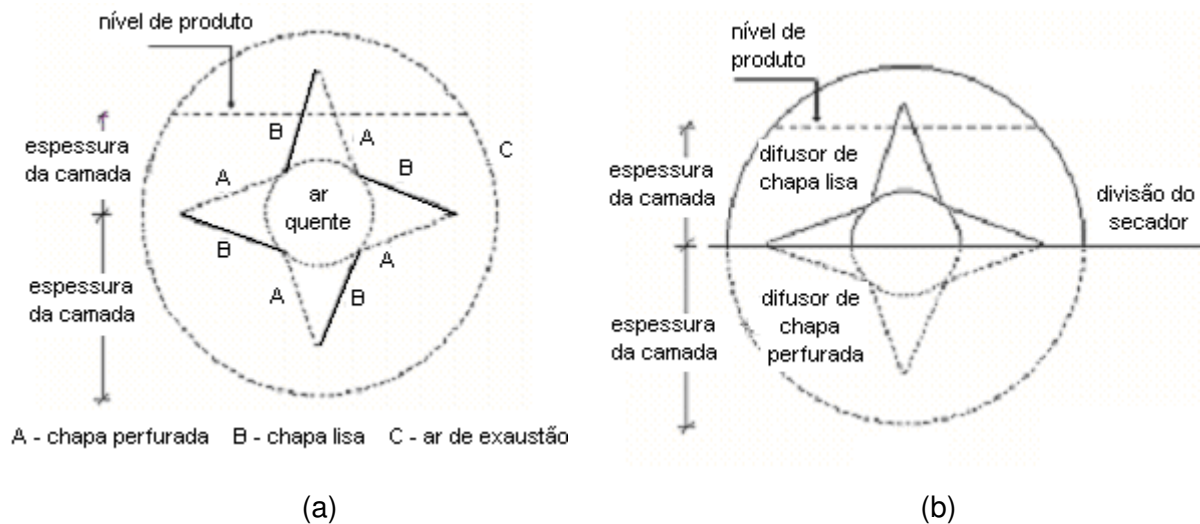
Os secadores foram carregados com café cereja lavado. Considerou-se que a carga estava completa, quando o nível de café atingia 0,10 m abaixo da abertura de carga, a fim de proporcionar a mistura dos frutos durante o início da secagem. No secador comercial, foi mantida a movimentação contínua do cilindro, permitindo que a massa de produto fosse revolvida durante todo o processo de secagem. No secador modificado, após avaliações prévias durante a etapa de mistura dos grãos, o sistema de revolvimento do produto foi feito durante 5 minutos, contados a partir de cada hora de secagem, isto é, 5 minutos de revolvimento e 55 minutos em camada estática. Após o revolvimento, o cilindro do secador modificado foi posicionado de tal forma que a metade correspondente à distribuição de ar através da massa de

produto fosse, sempre, a camada de maior espessura e mantinha-se em uma posição inferior, ou seja, abaixo do eixo longitudinal do cilindro. Em ambos secadores, o sistema de ventilação permaneceu ligado, continuamente, até o final da secagem, exceto durante as leituras de temperatura da massa de grãos.

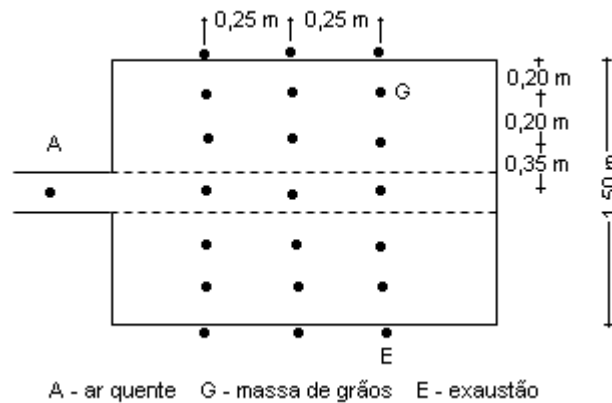
As curvas características dos ventiladores foram determinadas, conforme Costa (1978), para obtenção da potência e da vazão de ar.

Para monitorar as condições ambientais, utilizou-se um termohigrógrafo, previamente calibrado. O equipamento foi instalado em um abrigo meteorológico, conforme as recomendações técnicas do INMET e mantido em operação, durante todas as fases experimentais.

Para monitorar as temperaturas do ar de secagem, da massa de grãos e do ar de exaustão foram utilizados termopares do tipo "T" (cobre-constantan), cujo sinal elétrico era transmitido a um potenciômetro digital e convertido em temperatura, com precisão centesimal. A Figura 3 ilustra as posições dessas medições nos sistemas de secagem.



**Figura 2.** Cortes transversais do secador rotativo original (a) e do secador modificado (b)



**Figura 3.** Posições de monitoramento de temperatura nos sistemas de secagem comercial e modificado

No ponto "A" e em todos as outras, contidos no interior do duto de alimentação de ar quente, foi monitorada a temperatura do ar de secagem.

Os pontos "G" correspondem à temperatura da massa de grãos. Para monitorá-los, o sistema de ventilação era desligado, temporariamente, para que as medidas fossem feitas quando não houvesse fluxo de ar forçado através da massa de grãos. Admitiu-se que a temperatura da massa estivesse em equilíbrio com a temperatura do ar intergranular (Thompson et al., 1968). Os pontos "E" correspondem à temperatura de

exaustão do ar de secagem. Os termopares foram instalados a, aproximadamente, 0,01m da superfície do cilindro secador. Para monitorá-los no secador comercial, o sistema de movimentação de grãos era desligado durante as leituras.

Foi utilizado um manômetro diferencial (tubo "U"), com escala em milímetros de coluna de água (0 – 200), instalado em um ponto de medida tangente ao duto de admissão de ar quente, em uma posição intermediária entre o sistema de ventilação e o cilindro secador. As leituras foram realizadas a intervalos regulares de três horas, durante o processo de secagem.

O teor de água dos grãos, durante as operações de secagem, foi monitorado a intervalos regulares de três horas, utilizando-se o processo de destilação (EDABO – evaporação direta da água em banho de óleo) (Sabioni, 1984). Este procedimento foi adotado para acompanhamento do processo, pois, fornece resultados precisos em curto intervalo de tempo. Da mesma amostra de trabalho, foram obtidas subamostras as quais foram levadas para estufa com circulação forçada de ar, à temperatura de  $103 \pm 2$  °C, durante 72 horas, conforme a "American Association of Cereal Chemists".

Foi utilizada a metodologia proposta por Bakker-Arkema et al. (1978), considerando-se três testes por tratamento. Tal procedimento justifica-se devido à impossibilidade de obter repetições das avaliações de sistemas de secagem, considerando-se, principalmente, as variações ambientais, do material biológico (grãos) e da própria máquina. Em cada teste, o café foi secado de  $36,0 \pm 4,3$  % b.u. até que seu teor final de água atingisse um valor entre  $11,0 \pm 1,0$  % b.u.

Nos parâmetros relativos ao produto, determinaram-se os teores iniciais e finais de água (% b.u.), as massas específicas inicial e final ( $\text{kg m}^{-3}$ ), as massas inicial e final (kg), as temperaturas inicial e final (°C) e a análise de qualidade final do produto. Quanto ao ar de secagem, foram medidas as temperaturas inicial e final do ar intergranular (°C), temperatura do ar de exaustão (°C), temperatura do ar de secagem (°C), temperatura ambiente (°C) e a umidade relativa do ar ambiente (%). No secador, mediram-se a pressão estática (Pa), o fluxo de ar de secagem ( $\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-2}$ ), a área de secagem ( $\text{m}^2$ ) e a espessura da camada (m). Quanto ao combustível, foram medidos: o poder calorífico inferior ( $\text{kJ kg}^{-1}$ ), teor de água (% b.u.) e consumo ( $\text{kg h}^{-1}$ ). Em relação ao desempenho do equipamento, determinou-se o consumo específico de energia ( $\text{kJ kg}^{-1}$  de água evaporada), a duração do teste (h) em cada

tratamento e a redução no teor de água (% b.u.).

A avaliação da energia elétrica foi feita, baseando-se no tempo de operação e nas curvas características dos motores utilizados para movimentar o ar de secagem e a massa de produto durante o processo. As curvas características dos motores foram fornecidas pelo fabricante. A corrente elétrica e diferença de potencial foram monitoradas por meio de um multímetro digital com precisão decimal.

Para quantificar a energia necessária ao aquecimento do ar, mediu-se a massa de combustível em balança de plataforma, com capacidade para 500 kg e precisão de 50 g. O poder calorífico inferior do combustível foi medido em bomba calorimétrica (de Mahler). O teor de água do combustível foi medida em estufa, com circulação forçada de ar, à temperatura de  $103 \pm 2$  °C, até que as amostras apresentassem uma variação de peso final igual ou inferior a 2 %, em relação à última medida.

Os parâmetros de custo que envolve o processo de secagem são: energia para movimentar e aquecer o ar de secagem, trabalho humano, equipamentos, manutenção, taxas, seguros e juros (Young & Dickens, 1975). Na análise consideraram-se, separadamente, os custos energéticos de aquecimento e de movimentação do ar. Os outros custos serão assumidos e considerados como fixos, conforme apresentado a seguir.

a) O custo de combustível é, diretamente, proporcional à elevação da temperatura do ar acima da temperatura ambiente, fluxo de ar, tempo de secagem e preço do combustível. A estimativa dos custos de combustível é dada por

$$C_{comb} = \frac{(T - T_a) T_b \cdot \dot{m} (C_{pa} + S \cdot C_{pv}) \cdot P_1}{PCI \cdot e_1 \cdot A \cdot X} \quad (1)$$

em que,

$C_{comb}$  = custo do combustível para secagem, R\$  $\text{kg}^{-1}$  ou R\$  $\text{m}^{-3}$ ;

$T$  = temperatura do ar de secagem, ° C;  
 $T_a$  = temperatura do ar ambiente, ° C;  
 $T_b$  = tempo de secagem, h;  
 $\dot{m}$  = vazão mássica de ar, kg h<sup>-1</sup>;  
 $C_{pa}$  = calor específico do ar seco, kJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>;  
 $S$  = razão de umidade do ar, kg vapor.kg<sup>-1</sup>de ar seco;  
 $C_{pv}$  = calor específico do vapor de água, kJ kg<sup>-1</sup>;  
 $P_1$  = preço do combustível, R\$ unid<sup>-1</sup>;  
 $PCI$  = poder calorífico inferior do combustível, kJ kg<sup>-1</sup>;  
 $e_1$  = eficiência da combustão;  
 $A$  = área de secagem, m<sup>2</sup>; e  
 $X$  = espessura da camada de produto, m.  
 b) O custo de operação do ventilador pode ser estimado pela equação

$$C_{el} = \frac{Pot.T_b.P_2}{e_2} \quad (2)$$

em que,

$C_{el}$  = custo de operação do ventilador, R\$ m<sup>-3</sup>;  
 $Pot$  = potência despendida pelo ventilador, kW m<sup>-3</sup> de produto;  
 $P_2$  = preço da eletricidade, R\$ kWh<sup>-1</sup>;  
 $T_b$  = tempo de secagem, h; e  
 $e_2$  = eficiência do sistema de ventilação, decimal.

c) Os outros custos referem-se à depreciação dos equipamentos, manutenção, juros, seguros, impostos e mão-de-obra. Os demais custos são considerados fixos e, portanto, não são afetados pela quantidade de produto seco. O custo fixo pode ser estimado pela equação

$$C_f = \frac{P_3 + \left[ P_4 \cdot \frac{F}{T_{sm}} \right]}{\min \left[ \left( \frac{V_s}{T_s} \right); \frac{V_{max}}{T_{sm}} \right]} \quad (3)$$

em que,

$C_f$  = custo fixo, R\$ m<sup>-3</sup>;  
 $P_3$  = preço da mão-de-obra, R\$ h<sup>-1</sup>;  
 $P_4$  = preço inicial do sistema, R\$;

$F$  = custo de manutenção, depreciação, juros, fração decimal do custo inicial;  
 $T_{sm}$  = tempo de secagem máximo, h;  
 $V_s$  = volume do secador, m<sup>3</sup>;  
 $T_s$  = tempo requerido para a secagem, h; e  
 $V_{max}$  = máximo volume da produção anual, m<sup>3</sup>.  
 d) O custo total de secagem é estimado pela soma de todos os custos ( Equação 4).

$$C_T = C_{comb} + C_{el} + C_f \quad (4)$$

e) O custo total médio representa a razão entre o custo total e a quantidade de produto, ou

$$C_{TMe} = \frac{C_T}{q} \quad (5)$$

em que,

$C_{TMe}$  = custo total médio, R\$ sc<sup>-1</sup>; e  
 $q$  = quantidade de café seco e beneficiado, por ano, em cada unidade, sacas de 60 kg.

Chan et al. citados por Silva et al. (1992) desenvolveram um modelo para estimar o custo de secagem com base no custo mínimo e nas eficiências térmicas de cinco sistemas. Baseado nesta, o custo anual de secagem foi estimado por

$$C_a = \frac{[(C_1 + C_e + C_{mo} + C_i).V_t]}{C_s} + C_f + C_4 \quad (6)$$

em que,

$C_a$  = custo anual de secagem, R\$ ano<sup>-1</sup>;  
 $C_1$  = custo de combustível, R\$ h<sup>-1</sup>;  
 $C_e$  = custo de eletricidade para secagem, R\$ h<sup>-1</sup>;  
 $C_{mo}$  = custo de mão-de-obra, R\$ h<sup>-1</sup>;  
 $C_i$  = custo de inadequação do sistema, R\$ h<sup>-1</sup>;  
 $V_t$  = quantidade total a ser secada, m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>;  
 $C_s$  = capacidade de secagem m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>;  
 $C_f$  = custo fixo, R\$ ano<sup>-1</sup>; e  
 $C_4$  = custo de quebra técnica, R\$ ano<sup>-1</sup>.

Os custos de combustível e de eletricidade podem ser estimados, empregando-se as equações 7 e 8.

$$C_1 = \frac{E_a.P_1}{e_1.PCI} \quad (7)$$

$$C_e = \frac{Pot.P_2}{e_2} \quad (8)$$

em que,

$E_a$  = energia necessária para aquecer o ar,  $\text{kJ h}^{-1}$ ; e

Pot = potência do equipamento, kW.

O custo de mão-de-obra é função do tempo de secagem, e considera-se sua utilização parcial. Empregando-se a equação 9, pode-se ajustar este custo, ou

$$C_{mo} = n.p_3 \quad (9)$$

em que,

$n$  = constante de ajuste:  $n=0,4$  para fornalha a carvão/UFV e  $n =0,8$  para fornalha a lenha, (Silva et al., 2001).

O custo de inadequação é devido à impossibilidade de ajustes para que as operações de campo sejam sincronizadas, em um período de tempo adequado, para atendimento da capacidade de colheita. Pode ser estimado pela equação

$$C_i = \frac{F_1.P_5.V_t}{F_p.N_h} \quad (10)$$

em que,

$C_i$  = custo de inadequação,  $\text{R\$ h}^{-1}$ ;

$F_1$  = fator de inadequação, quando se estuda o café  $F_1=0,002 \text{ dia}^{-1}$ ; (Silva et al., 2001)

$P_5$  = preço do produto,  $\text{R\$ m}^{-3}$ ;

$F_p$  = fator de programação: antecipada =  $0,2 \text{ ano}^{-1}$ , atrasada =  $2,0 \text{ ano}^{-1}$  e balanceada =  $4,0. \text{ano}^{-1}$ ;

$V_t$  = quantidade total a ser secada,  $\text{m}^3.\text{ano}^{-1}$  e

$N_h$  = tempo de secagem por dia,  $\text{h.dia}^{-1}$ .

O custo fixo, que inclui a depreciação, os juros e impostos, pode ser estimado como porcentagem do custo inicial, pela equação

$$C_f = F.P_4 \quad (11)$$

em que,

$C_f$  = custo fixo,  $\text{R\$ ano}^{-1}$ ;

$F$  = fator de depreciação, manutenção, juros e fração decimal do custo inicial; e

$P_4$  = preço inicial do sistema,  $\text{R\$}$ .

Ao custo de quebra técnica são incorporadas as perdas de matéria seca ocorrida durante a secagem, a secagem em excesso ou incompleta e a perda na qualidade. Contudo, em razão da dificuldade em estimar esses valores, consideraram-se, geralmente, as perdas de matéria seca, empregando-se a equação

$$C_4 = F_q.P_5.V_t \quad (12)$$

em que,

$C_4$  = custo de quebra técnica,  $\text{R\$ ano}^{-1}$ ;

$F_q$  = fator de quebra técnica ( $F_q = 0,005$ , Silva et al., (2001));

$P_5$  = preço do produto,  $\text{R\$ m}^{-3}$ ; e

$V_t$  = quantidade total a ser secada,  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ .

A análise de qualidade do café foi realizada nos laboratórios da empresa INCOFEX – Armazéns Gerais e Cafeeiras, conforme as normas estabelecidas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Foram considerados os padrões de tipo e bebida para o café verde cru. Como testemunha, cerca de 100 kg de frutos provenientes da mesma carga, de cada teste, foram secados artificialmente em terreiro pavimentado com cimento.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

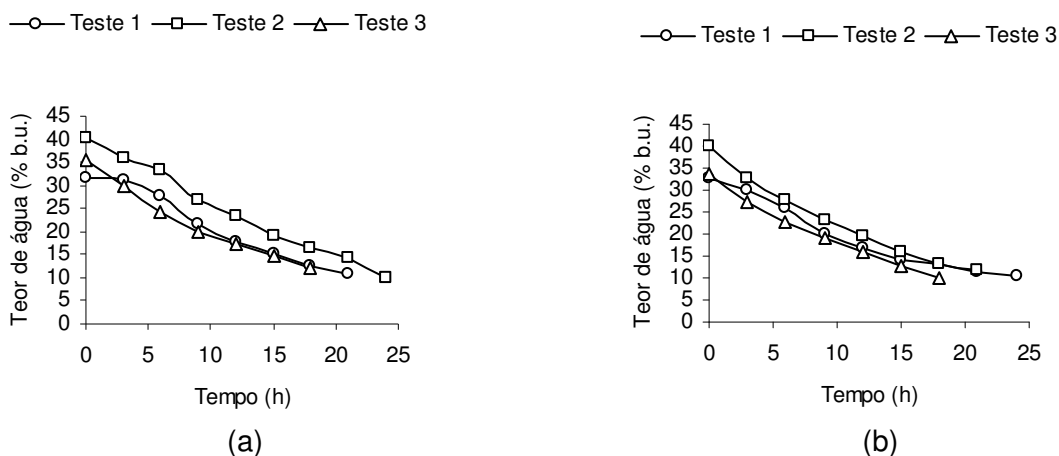
As curvas de secagem do café, para os secadores em estudo, podem ser observadas na Figura 4. Observa-se que, em ambos os sistemas, os tempos de secagem foram aproximadamente iguais, para teores iniciais e finais de água do produto, padronizados entre 30 e 40 % b.u. no início e 10 a 11,5 % b.u., no final do processo. Este procedimento vem ao encontro da metodologia proposta por Bakker-Arkema et al. (1978) para análise de sistemas de secagem, ao sugerir um padrão para os teores iniciais e finais de água do produto.

As variações de temperatura do ambiente, da massa dos frutos e do ar intergranular, de secagem e de exaustão,

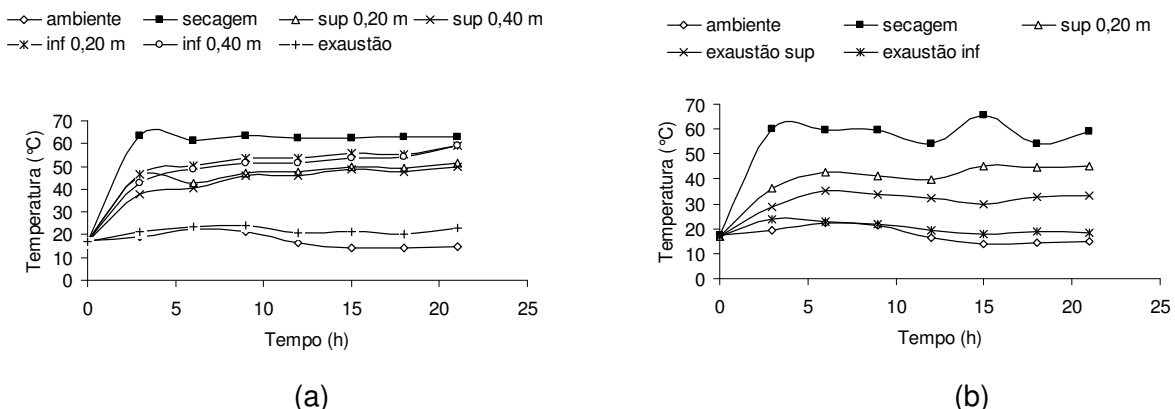
para os três testes, podem ser observadas nas figuras 5, 6 e 7.

Observa-se que não foi possível manter a temperatura do ar de secagem em 60 °C, sendo observados valores médios de 62,6±0,7; 61,5±1,2 e 62,1±1,2 °C no secador rotativo modificado e 58,8±3,9; 62,0±2,0 e 60,2±2,2 °C no secador rotativo comercial, nos testes 1, 2 e 3, respectivamente.

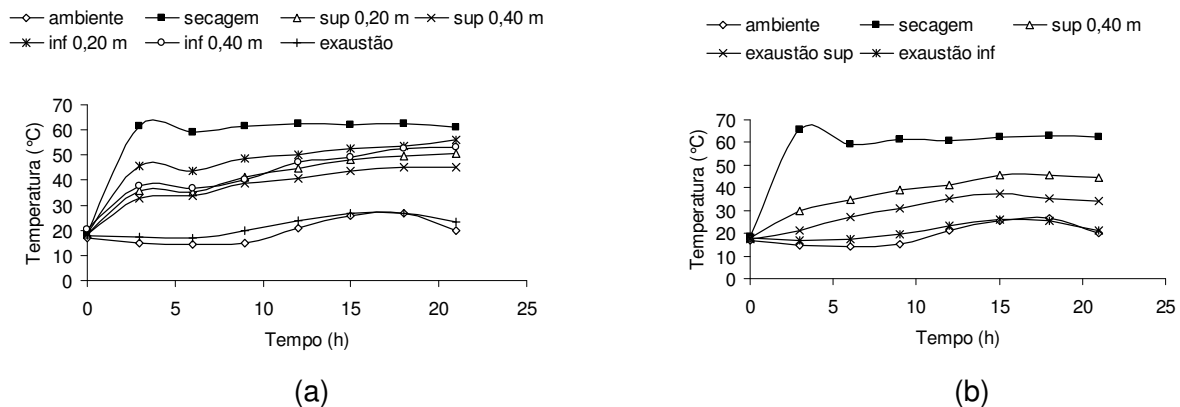
No secador modificado, verifica-se que as temperaturas da massa na porção média superior do secador, nos níveis de 0,20 m e de 0,40 m, mantiveram-se próximas, durante todo o processo de secagem. A parte superior do secador, por não receber ar aquecido durante 5 minutos, em cada hora, transformou-se em câmara de repouso, permitindo, neste intervalo, que houvesse uma distribuição de umidade nos frutos.



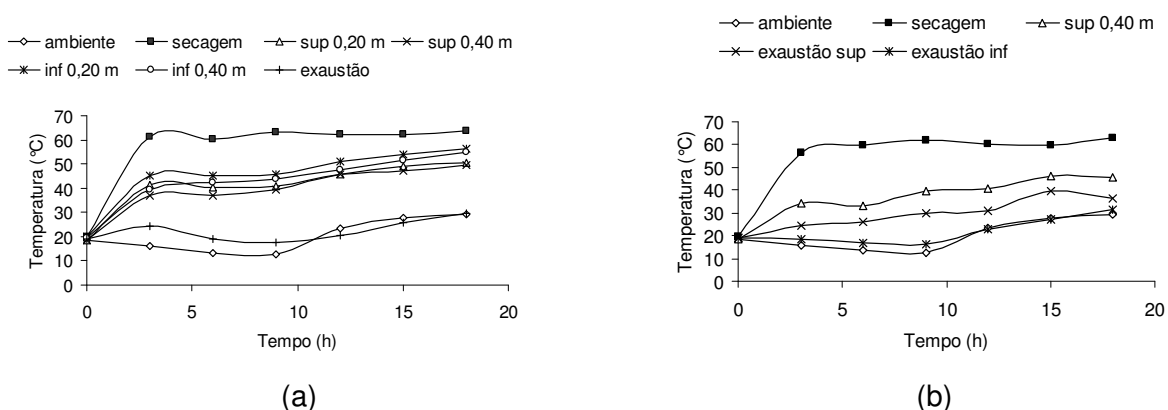
**Figura 4.** Curvas de secagem de frutos de café cereja lavado, nos secadores modificado (a) e comercial (b)



**Figura 5.** Variação das temperaturas do ar ambiente, de secagem, de exaustão e da massa de frutos nos secadores modificado (a) e comercial (b), no primeiro teste



**Figura 6.** Variação das temperaturas do ar ambiente, de secagem, de exaustão e da massa de frutos nos secadores modificado (a) e comercial (b), no segundo teste



**Figura 7.** Variação das temperaturas do ar ambiente, de secagem, de exaustão e da massa de frutos nos secadores modificado (a) e comercial (b), no terceiro teste

A parte inferior do secador modificado, recebendo ar aquecido, funcionou semelhantemente a um sistema em leito fixo, durante os intervalos de 55 minutos. Observa-se que a temperatura da massa a 0,20 m do difusor foi, sempre, superior àquela observada a 0,40 m, o que era esperado. Na parte superior, funcionando como câmara de repouso, os valores de temperatura foram mantidos próximos, nos níveis de 0,20 m e de 0,40 m, nos três testes.

No secador comercial, a temperatura do ar de exaustão medida na parte inferior foi sempre, menor que na parte superior. Como a espessura da camada de café na parte superior da massa é menor devido a redução no volume dos frutos, houve um direcionamento de maior fluxo de ar nesta região e de menor fluxo na porção inferior da massa. Este comportamento indica uma perda de energia, através do ar de secagem, no

terço médio superior do secador. As temperaturas da massa mantiveram-se próximas entre si, acompanhando o comportamento da temperatura do ar de secagem.

A temperatura do ar de secagem manteve-se com variações mínimas nos três testes, no secador modificado. Isto ocorreu pelo fato de ter sido utilizado um combustor com aquecimento direto, com queima de carvão, garantindo um abastecimento contínuo. A utilização de lenha no combustor de queima indireta, nos três testes do secador comercial, proporcionou maior oscilação da temperatura do ar de secagem.

No Quadro 1, são apresentados os resultados obtidos na avaliação dos secadores rotativos, durante a secagem do café cereja. O tempo de secagem nos dois secadores foi, aproximadamente, igual para variações de umidades aproximadas.

**Quadro 1.** Resultados obtidos experimentalmente nos três testes, no secador horizontal rotativo modificado (MOD) e no secador horizontal rotativo comercial (COM)

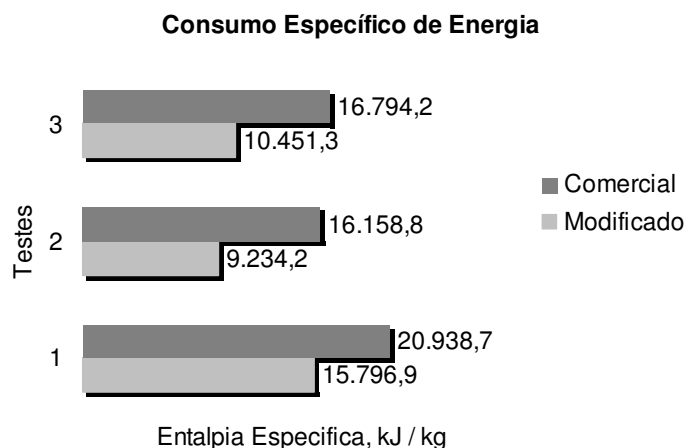
Parâmetros	Teste 1		Teste 2		Teste 3	
	MOD	COM	MOD	COM	MOD	COM
<b>Do produto</b>						
Teor de água inicial. % b.u.	31.7	32.6	40.2	40.1	35.5	33.6
Teor de água final. % b.u.	10.7	10.5	10.0	11.9	11.5	10.1
Temperatura inicial. °C	17.1	17.0	18.9	17.9	19.1	18.5
Temperatura final. °C	54.8	44.9	51.3	44.3	52.8	45.7
Massa específica inicial. kg m <sup>-3</sup>	407.5	407.5	415.3	415.3	391.6	391.6
Massa específica final. kg m <sup>-3</sup>	361.7	402.7	387.6	409.5	387.6	402.7
Massa inicial. kg	664.8	770.0	875.0	886.0	723.5	780.0
Massa final. kg	508.6	578.8	581.0	602.9	527.3	575.6
<b>Do ar</b>						
Temperatura de secagem. °C	62.6	58.8	61.5	62.0	62.1	60.2
Temperatura ambiente. °C	17.5	17.5	19.3	19.3	20.1	20.1
Temperatura exaustão sup.. °C	---	32.3	---	31.6	---	31.2
Temperatura exaustão inf.. °C	22.1	20.4	22.1	21.4	22.7	22.2
Umidade relativa ambiente. %	92.5	92.5	81.8	81.8	74.4	74.4
<b>Do secador</b>						
Fluxo de ar. m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	50.7	20.8	50.3	20.8	50.3	20.8
Espessura da camada. m	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Área de secagem. m <sup>2</sup>	1.4	2.8	1.4	2.8	1.4	2.8
Pressão estática. Pa	107.8	29.4	117.6	29.4	137.2	29.4
<b>De energia</b>						
Tipo de combustível	carvão	lenha	carvão	lenha	carvão	lenha
Massa de combustível. kg	87.8	258.2	96.5	297.0	73.0	222.7
Poder Calorífico Inf.. kJ kg <sup>-1</sup>	27.316	15.033	27.316	15.033	27.316	15.033
Consumo de comb.. kg h <sup>-1</sup>	4.2	12.3	4.0	12.9	4.1	12.4
Custo do combustível. R\$ kg <sup>-1</sup>	3.3	2.1	3.2	2.3	2.7	1.8
<b>Do desempenho</b>						
Duração do teste. h	21.0	21.0	24.0	23.0	18.0	18.0
Consumo espec. de energia						
Com energia elétrica. kJ kg <sup>-1</sup>	15.797	20.938	9.234	16.159	10.451	16.794
Sem energia elétrica. kJ kg <sup>-1</sup>	15.352	20.415	8.964	15.772	10.148	16.375

A pressão estática no secador modificado variou entre 107,8 e 137,2 Pa, enquanto no secador comercial manteve-se constante em 29,4 Pa. Verifica-se que a vazão específica de ar no sistema modificado foi, aproximadamente, 44,1 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> de ar/m<sup>3</sup> de grãos e no sistema comercial foi 36,4 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> de ar/m<sup>3</sup> de grãos. Este comportamento deve ser considerado, uma vez que a massa de ar é que remove massa de água. Observou-se ainda que, além da menor vazão específica, no secador comercial, a maior fluidez de ar ocorreu no

terço superior da massa de produto, onde a espessura da camada era menor. Este comportamento proporcionou maior velocidade e menor aproveitamento do ar de secagem, conforme se observa nos valores de temperatura da exaustão superior (Figuras 5; 6 e 7). Durante a secagem com o secador modificado, não considerando o consumo de energia elétrica, observaram-se consumos específicos de energia de 15.351,9; 8.964,0 e 10.147,7 kJ kg<sup>-1</sup> de água evaporada para os testes 1, 2 e 3, respectivamente.

É importante ressaltar que, neste secador, foi utilizada uma fornalha para aquecimento direto do ar de secagem, enquanto, no secador comercial, o aquecimento do ar foi feito por meio de trocador de calor ou indiretamente. Esta condição impede uma análise energética em condições comparativas, em função da diferença de eficiência entre os combustores, mesmo sendo os testes realizados simultaneamente. No secador rotativo comercial, foram obtidos consumos específicos de energia correspondentes a 20.415,3; 15.771,5 e 16.374,5 kJ kg<sup>-1</sup> de água evaporada, para os testes 1; 2 e 3, representando uma economia de energia de 24,8; 43,2 e 38,0 % para os testes 1, 2 e 3, respectivamente. Entretanto, esta economia de energia, no aquecimento do ar, pode não ser devido apenas à modificação do sistema, mas também ao

fato de os combustores com queima direta apresentarem maior eficiência termodinâmica do que os de queima indireta. O emprego de diferentes combustíveis no processo de secagem poderá apresentar alguma influência, relativamente ao custo da operação, uma vez que a unidade calórica influenciará em maior ou menor massa demandada para o aquecimento de uma unidade de massa de ar. Observa-se que a demanda de lenha variou entre 222,7 e 297,0 kg, enquanto a de carvão vegetal foi de 73,0 e 96,5 kg, para um poder calorífico inferior de 15,0 e 27,3 MJ, respectivamente. Durante a secagem, no secador rotativo modificado, observou-se que o mesmo requer menos energia para evaporar uma unidade de massa de água, ou seja, os secadores são mais eficientes, em termos de consumo específico de energia (kJ.kg<sup>-1</sup> de água evaporada), Figura 8.



**Figura 8.** Consumo específico de energia nos testes 1, 2 e 3

A avaliação econômica foi feita, calculando-se os custos de mão-de-obra, combustível, energia elétrica, depreciação de capital fixo e custo total. Energeticamente, a secagem com lenha foi menos eficiente que a secagem com carvão vegetal, apresentando menores valores de eficiência e maiores consumos específicos de energia. Quanto aos combustíveis, o custo da secagem foi estimado, usando-se os preços médios de mercado, vigentes na região de Viçosa-MG, lenha R\$ 40,00 o metro cúbico (≈390 kg) e carvão vegetal R\$120,00 o metro cúbico

(≈250 kg). Nos testes 1, 2 e 3, os custos de combustível para os tratamentos, em que foi usado o carvão vegetal, representam 28,0 %, 29,9 % e 23,1 % do custo total de secagem. Já a participação do custo do combustível nos testes com lenha representaram, respectivamente, 12,2 %, 13,6 % e 10,6 % do custo total da secagem. Ou seja, considerando-se apenas o custo de combustível, o carvão vegetal foi aproximadamente 220 % mais caro do que a secagem em que a lenha foi utilizada como combustível.

Cardoso Sobrinho et al. (2000), usando GLP e lenha obtiveram menor custo de secagem, quando o ar de secagem foi aquecido com lenha. Em muitos casos, a decisão de optar por um sistema ou outro de aquecimento do ar baseia-se apenas no custo do combustível, não levando em conta outros custos, que podem resultar na escolha de sistemas de custos totais mais elevados, ou mesmo com custos semelhantes, porém, com desvantagens operacionais. Considerando os custos fixos e variáveis, observou-se que o custo total de secagem do café com o uso do carvão vegetal e com o uso da lenha para aquecimento do ar foram praticamente iguais, sendo R\$ 12,6; R\$ 12,4 e R\$ 12,6

para a lenha e R\$ 13,3; R\$ 12,5 e R\$ 11,9 para o carvão vegetal, por saca de café seco, nos testes 1, 2 e 3, respectivamente.

No Quadro 2, verifica-se que a qualidade final do produto não foi alterada, quer pela secagem no secador rotativo modificado, quer no secador rotativo comercial. Em relação ao aspecto comercial, o produto apresentou boa classificação, visto que o tipo 6 é considerado como referência comercial do Brasil. Nas análises do produto, não foram detectados odores residuais, oriundos da presença de incombustos ou fumaça no ar de secagem, indicando que os sistemas de aquecimento estão adequados ao seu funcionamento.

**Quadro 2.** Resultados da análise do tipo e da qualidade da bebida do café

Sistema	Teste	Tipo	Bebida
Secador Rotativo Modificado	1	6-7	Duro
	2	5-6	Duro
	3	5-6	Duro
Secador Rotativo Comercial	1	5-6	Duro
	2	5-6	Duro
	3	6-7	Duro
Terreiro (Testemunha)	1	4-5	Duro
	2	5-6	Duro
	3	5-6	Duro

## CONCLUSÕES

- O secador rotativo modificado apresentou menor entalpia específica de energia em todos os testes, em comparação com o comercial, apresentando uma redução de  $34,0 \pm 9,2$  % na demanda energética.
- A demanda de energia elétrica para movimentação do produto durante a secagem foi, aproximadamente, 91 % menor no secador modificado, em relação ao comercial.
- O custo, apenas de combustível, no secador modificado foi 220 % maior que no comercial; no entanto, o custo total de secagem no secador modificado foi, praticamente, igual ao do secador comercial.

- O tempo de secagem não foi alterado, em função da modificação na distribuição do ar e movimentação dos grãos.
- O emprego de fornalha com fogo direto, com a queima de carvão, não influenciou a qualidade do produto, em relação à testemunha.
- A maior temperatura do ar de exaustão, medida acima do eixo longitudinal do secador, para iguais condições de secagem, sugere menor eficiência, relativa ao aproveitamento do ar de secagem, no secador rotativo comercial.
- Não foi observado comprometimento da qualidade final do produto, em função das modificações executadas na estrutura do secador e no sistema de operação.

## AGRADECIMENTOS

À indústria de secadores Máquinas Pinhalense, pela cessão dos módulos dos secadores utilizados no experimento. Ao produtor de café Raimundo Santana, pela cessão do produto utilizado neste experimento. À Capes, pelo apoio ao desenvolvimento dos trabalhos, com a disponibilização de uma bolsa. À Universidade Federal de Viçosa, pela disponibilidade de sua infra-estrutura para a formação de pessoal em nível de Pós Graduação em Engenharia Agrícola.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, J.M. de. Efeito da temperatura sobre o rendimento e propriedades dos produtos da carbonização de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Viçosa: UFV, 1983. 40p. (Dissertação de mestrado).
- BAKKER – ARKEMA, F.W.; LEREW, L.E.; BROOK, R.C.; BROOKER, D.B. Energy and capacity performance evaluation of grain dryers. St Joseph: **ASAE**, 1978. 13p. (Paper 78: 3523)
- CARDOSO SOBRINHO, J., SILVA, J.N., LACERDA FILHO, A.F., SILVA, J.S. Custos comparativos de secagem de café usando-se lenha de eucalipto e gás liquefeito de petróleo. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1, 2000, Poços de Caldas. Resumos...Poços de Caldas: Embrapa Café; 2000. p. 1132-1137.
- COSTA, E.C. **Compressores**. São Paulo: Edgard Blücher. 172p.1978.
- LACERDA FILHO, A.F. de. Avaliação de uma unidade de beneficiamento de sementes de milho. Botucatu: UNESP, 1998. 198p. (Tese de doutorado).
- LOPES, R.P. Desenvolvimento de um sistema gerador de calor com opção para aquecimento direto e indireto de ar. Viçosa: UFV, 2002. 220p. (Tese de doutorado).
- LOPES, R.P.; CARDOSO SOBRINHO, J.; SILVA, J.S.; SILVA, J.N. Fontes de energia para secagem de café. Viçosa: UFV, 2001. 26p. **Engenharia na Agricultura**, *Boletim técnico*, 3.
- SABIONI, P.M.; FARIA, M.N.; HARA, T. Determinador de umidade de grãos experimental – EDABO In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 14, 1984, Fortaleza. Anais...Fortaleza: SBEA, 1984. p. 62.
- SILVA, J. de S. e; SABIONE, P.M.; AFONSO, A.D.L.; PINTO, F.A.C. Avaliação de secadores e custo de secagem de produtos agrícolas. **Engenharia na Agricultura**. v.2, n.4, 19p. 1992
- SILVA, I.D. Projeto, construção e teste de uma fornalha a carvão vegetal para secagem de café. Viçosa: UFV, 1998. 81p. (Dissertação de mestrado)
- SILVA, J.S. Protótipo de um secador rotativo modificado. Projeto de pesquisa em andamento. Comunicação pessoal, 2001.
- SILVA, J.S., SAMPAIO, C.P., MACHADO, M.C., LO MONACO, P.A. Preparo secagem e armazenagem. In: SILVA, J.S. (eds.). **Secagem e armazenagem de café: tecnologias e custos**, Viçosa: UFV, 2001, p.01-60.
- THOMPSON, T.L.; FOSTER, G.H.; PEART, R.M. Mathematical simulation of corn drying – a new model. **Transaction of the ASAE**, st. Joseph, Michigan, 11 (4): 582-586, 1968.
- YOUNG, J.H., DICKENS, J.W. Evaluation of costs for drying grains in batch or cross-flow systems. **Transactions of the ASAE**. v. 8, n. 4, p. 734-38. 1975.