

Douglas Romeu da Costa ¹, Adílio Flauzino de Lacerda Filho ², Juarez de Sousa e Silva ³ Daniel Marçal de Queiroz ⁴
Pedro Nogueira Lima ⁵

RESUMO

Objetivou-se, com este trabalho, analisar a viabilidade do uso de secadores rotativos, com distribuição radial de ar, utilizados na cafeicultura, para a secagem de milho. Avaliou-se o consumo de energia e o custo de secagem do produto. A temperatura do ar de secagem foi controlada em 80 e 100 °C. Os sistemas de secagem foram compostos por um secador rotativo comercial e um secador rotativo modificado. Utilizou-se o GLP como fonte de energia para o aquecimento complementar do ar de secagem. O milho em grãos (*Zea mays* L.), com teor inicial de água de aproximadamente 18,6% b.u., foi usado no experimento. Para a avaliação da eficiência energética dos sistemas de secagem, foram determinados o consumo específico de energia, os consumos de combustível e de energia elétrica. Pelos resultados, verificou-se menor consumo específico de energia no secador rotativo modificado. A susceptibilidade à quebra do produto foi inferior a 5%. A percentagem média de trinca total do milho no secador comercial (SC 80 e SC 100) foi 17,6% superior àquela obtida com secador modificado (SM 80 e SM 100). O custo total médio de secagem no secador comercial (SC 80 e SC 100) foi menor que o obtido com o secador modificado (SM 80 e SM 100).

Palavras-chave: Custo de secagem, secador rotativo, milho.

ABSTRACT

COST ANALYSIS OF MAIZE DRYING SYSTEMS USING MECHANICAL DRIERS

This study was done to analyze the feasibility of using rotary dryers with radial air distribution, generally used for coffee processing, for corn (*Zea mays* L.) grain drying, based on energy consumption and drying cost. The drying air temperature was maintained at 80 or 100 °C with use of liquid petroleum gas. The drying systems consisted of a commercial and a modified rotary dryer. Corn grains with initial moisture content of about 18.6% b.u. were used in the experiment. The specific energy consumption and the consumption of fuel and electricity were determined to evaluate energy efficiency of the drying systems. The results showed lower specific energy consumption for the modified rotary dryer. The breakage susceptibility of grains was below 5%. The mean percentage of total grain cracking in the commercial dryer (SC 80 and SC 100) was 17.6% higher than that obtained with the modified dryer (SM 80 and SM 100). The mean total drying cost in the commercial dryer (SC 80 and SC 100) was lower than that of the modified dryer (SM 80 and SM 100).

Keywords: Drying cost, rotary dryer, corn.

Recebido para publicação em 10/11/2008. Aprovado em 12/11/2009

- 1 - Eng° Agrícola e Ambiental, Doutorando em Engenharia Agrícola, Dep. de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, MG, 36570-000, Brasil, e-mail: douglascosta@vicosa.ufv.br
2 - Professor Associado I, Dep. de Engenharia Agrícola, UFV, e-mail: alacerda@ufv.br
3 - Professor Voluntário, Dep. de Engenharia Agrícola, UFV, e-mail: juarez@ufv.br
4 - Professor Associado I, Dep. de Engenharia Agrícola, UFV, e-mail: marçal@ufv.br
5 - Eng° Agrícola e Ambiental, Dep. de Eng. Agrícola, UFV, e-mail: Pedroufv@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

A estimativa de produção de milho no Brasil, safra 2009/2010, é de aproximadamente 52,2 milhões de toneladas. Os estados do Paraná e Mato Grosso são os que mais contribuem para esta produção, com 12,5 e 7,1 milhões de toneladas, respectivamente. Estima-se que do total de grãos produzidos no país, na safra 2009/2010, o milho contribuirá com 36,8%, superado apenas pela produção de soja, 44,9% (CONAB, 2009).

Com o crescimento da produção desse cereal e com a exigência, cada vez maior, da qualidade do produto no mercado nacional e internacional, torna-se necessário o desenvolvimento de sistemas de secagem eficientes que conservem a qualidade dos grãos a um menor custo possível.

Brooker *et al.* (1992), afirmaram que, na seqüência de colheita, secagem, armazenagem, manuseio e transporte durante o processamento de grãos, a secagem é a operação crítica. Concluíram que a secagem requer mais de 60,0% do total de energia utilizada na produção, enquanto os tratamentos culturais consomem 16,0%, o plantio e cultivos 12,0%, a colheita 6,0% e o transporte 6,0%. Essas afirmativas são reforçadas por Lopes *et al.* (2000), o que asseguram que na produção de grãos, a secagem, no caso específico do milho, pode representar até 50% do total de energia utilizada. As operações de secagem e armazenagem, quando conduzidas corretamente e com equipamentos eficientes, contribuem significativamente para a redução do custo operacional, em razão da economia de energia que propiciam.

Os secadores rotativos com distribuição radial do fluxo de ar existentes no mercado foram projetados para a secagem de café. Porém, muitos cafeicultores são também produtores de milho, e devido ao desconhecimento da possibilidade de uso desses secadores para a secagem do milho e por este produto apresentar menor valor unitário, não têm utilizado esse secador para esse cereal. Deve-se ressaltar que nenhum trabalho até o momento mostrou a utilização do secador rotativo para a secagem desse produto.

Mesmo sendo intensamente realizada por pesquisadores, a estimativa do custo de secagem não constitui, no Brasil, rotina das unidades de beneficiamento ou secagem de grãos ou sementes (LACERDA FILHO, 1998).

Young & Dickens (1975) afirmaram que poucos esforços foram despendidos com o intuito de eficientizar os processos de secagem, com vistas à conservação de energia ou de capital. Os autores discutiram um método para a análise do custo de secagem de milho e os efeitos que vários parâmetros de secagem têm sobre esse custo. Estabeleceram vários parâmetros a serem considerados e verificaram que o tempo de secagem é um deles, podendo ser estimado por modelos matemáticos. Os autores concluíram que o fluxo de ar que resulta em um mínimo custo total de secagem depende de uma série de fatores, como a temperatura de secagem e o teor inicial de água do grão e que o custo total de secagem, geralmente, é menor para as temperaturas de secagem mais elevadas.

Dentre outros autores, afirmativas de Young & Dickens (1975) são reforçadas por Portella & Eichelberger (2001) que, trabalhando com secador estacionário de leito fixo, utilizando gás liquefeito de petróleo (GLP) em secagens de milho, concluíram que os custos de combustível e de energia elétrica foram menores quando a temperatura do ar de secagem foi mais elevada e com menor teor de água dos grãos e que o custo energético total foi 23% menor quando aumentou a temperatura do ar de secagem de 40 para 70 °C e 13% menor quando esse aumento foi de 70 para 100 °C.

Reinato *et al.* (2002), trabalhando com geradores de calor de GLP, avaliaram o custo de combustível em secagens de café cereja com teores iniciais e finais de água de 38,03 e 13,49% b.u.; 21,96 e 11,58% b.u.; 21,97 e 11,73% b.u. em secadores rotativos com capacidade para 15 m³. Concluíram que o custo de combustível na secagem, operando o gerador de calor a gás com a chama intermitente, foi maior quando comparado com a chama constante.

Diante do exposto, objetivou-se com esse trabalho avaliar um secador amplamente utilizado na cafeicultura (tipo rotativo), para a secagem de milho. Especificamente, objetivou-se avaliar o custo total de um sistema de secagem em lotes, em secador rotativo, com modificação no sistema radial de distribuição de ar, operando com intermitência, em comparação com outro sistema comercial, original de fábrica.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado na Área de Armazenamento e Pré-processamento de Produtos Vegetais do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. O produto analisado foi milho (*Zea mays* L.) a granel, com teor inicial de água de 20% b.u.. Foram utilizados dois secadores rotativos, sendo um caracterizado como secador comercial (Figura 1a), e outro como secador modificado (Figura 1b). A modificação, feita por Santos (2002), consistiu em direcionar o fluxo de ar apenas para a parte inferior do secador, onde a massa de grãos se mantém com maior espessura, durante a secagem. Para tanto, obstruíram-se os furos das chapas difusoras, alternadas, conforme a forma original do sistema (Figura 2a), fixando-as consecutivamente (Figura 2b). Uma chapa metálica lisa foi colocada externamente, cobrindo a metade do perímetro cilíndrico do secador, obstruindo seus furos. Buscou-se, com isso, a uniformidade da distribuição do ar de secagem durante todo o processo. O carregamento e a descarga dos secadores foram feitos por meio de um transportador helicoidal com potência nominal igual a 2,2 KW.

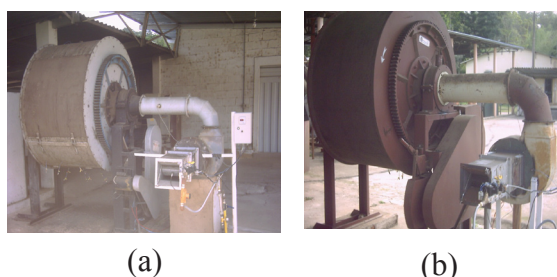


Figura 1. Secadores rotativos comercial (a) e modificado (b), com distribuição radial do fluxo de ar, instalados juntamente aos geradores de calor a gás.

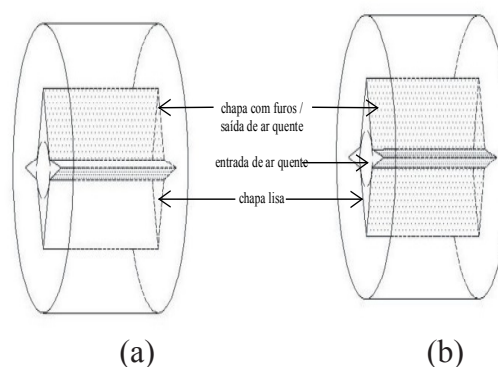


Figura 2. Croqui: modificação no sistema de distribuição de ar, nos difusores do secador (solicitação de patente protocolada)

O aquecimento do ar de secagem, nos dois secadores, foi realizado por meio de geradores de calor a gás, fornecidos por uma distribuidora do produto.

O experimento foi caracterizado pelos tratamentos apresentados no Quadro 1.

A análise do sistema de secagem foi realizada adaptando-se a metodologia descrita por Bakker-Arkema (1978). Por esta metodologia os secadores foram analisados considerando-se três testes por tratamento. Esse procedimento é necessário devido ao fato de ser praticamente impossível se obter repetições das análises de sistemas de secagem, considerando-se, principalmente, as variações das condições do ambiente, do material biológico (grãos) e do próprio secador.

No secador comercial a massa de grãos foi revolvida continuamente, do início ao final da secagem. No sistema modificado, a movimentação dos grãos foi realizada em intervalos regulares de

Quadro 1. Descrição dos tratamentos dos sistemas de secagem

Tratamento	Ar de secagem (°C)	Sistema de ventilação	Movimentação dos grãos	Tipo de secador ⁽¹⁾
T1	80	tempo integral	5 min. a cada 1 h	SM 80
T2		1 h ligado / 1 h desligado	5 min. a cada 2 h	SM 80 – I
T3	100	tempo integral	5 min. a cada 1 h	SM 100
T4		1 h ligado / 1 desligado	5 min. a cada 2 h	SM 100 – I
T5	80	Conforme o fabricante (ventilador ligado em tempo integral)	Tempo integral	SC 80
T6	100			SC 100

(1) SM e SC referem-se aos secadores rotativos, modificado e comercial, respectivamente. Os números referem-se às temperaturas do ar de secagem.

5 minutos para cada intervalo de repouso de 1 hora (Quadro 1).

No secador comercial, o sistema de ventilação foi mantido ligado em tempo integral, conforme as orientações contidas no manual do fabricante. O secador modificado teve o ventilador ligado, estabelecendo-se um intervalo de repouso de 1 h com o ventilador ligado para 1 h desligado. Este secador também operou com o sistema de ventilação ligado em tempo integral (Quadro 1).

A umidade relativa do ar ambiente foi monitorada por meio de um termohigrógrafo e um psicrômetro, instalados em um abrigo meteorológico, anexo à área experimental.

O teor de água dos grãos foi monitorado por meio de estufa, com circulação forçada de ar, à temperatura de 105 ± 3 °C, durante 24 horas (BRASIL, 1992) e, para o acompanhamento efetivo da secagem, utilizou-se o aparelho MOTOMCO, modelo 919[®], conforme o manual de operações.

A temperatura do ar atmosférico foi monitorada por meio de termohigrógrafo, dotado de um termômetro bi-metálico, instalado em um abrigo meteorológico.

As temperaturas do ar de secagem, do ar de exaustão e da massa de grãos foram monitoradas por meio de termopares tipo “T” previamente calibrados. As leituras foram realizadas por meio de um termômetro digital. As temperaturas do ar de secagem foram mantidas em 80 ± 4 °C e 100 ± 4 °C.

A pressão estática observada, devido às perdas de cargas relativas ao processo de secagem, foi monitorada, continuamente, por meio de um manômetro diferencial. A vazão do ar de secagem foi obtida a partir da curva característica do ventilador, conforme Costa (1978).

Estimou-se a energia necessária para o aquecimento do ar de secagem considerando-se o poder calorífico inferior do combustível. O con

$$E_r = \frac{PCI \ c \ t \ (100 - U_f)}{M \ (U_i - U_f)} \quad (1)$$

em que

E_r = consumo específico real de energia, kJ kg⁻¹ de água evaporada;

PCI = poder calorífico inferior do combustível, 46.460 kJ kg⁻¹;

c = consumo mássico de GLP, kg h⁻¹;

t = tempo total de secagem, h;

M = massa inicial do produto, kg;

U_i = teor inicial de água do produto, % b.u.; e

U_f = teor final de água do produto, % b.u.;

O uso da eletricidade foi estimado com base na potência nominal dos motores utilizados para as operações de carga e descarga dos secadores, movimentação dos grãos e do ar e no tempo efetivo de operação. As eficiências dos motores elétricos foram obtidas por meio do catálogo do fabricante.

A potência do ar foi estimada conforme os valores médios de pressão estática e vazão, de acordo com a equação 2.

$$P = \frac{Q \ p_e}{4500} \quad (2)$$

em que

P = potência do ar, cv;

Q = vazão de ar, m³ min⁻¹;

p_e = pressão estática, mmca; e

4500 = coeficiente de transformação de unidades.

O consumo de gás foi medido por meio de um rotâmetro, marca DIGIFLOW, instalado na linha de fluxo do secador modificado e por um medidor Lao G-1, registrador de leitura direta com precisão de 0,001 m³, marca FAMABRAS, instalado no secador comercial.

A análise de qualidade do milho foi realizada com base nas Especificações para a Padronização, Classificação e Comercialização Interna do Milho, conforme o estabelecido pela Portaria nº 845, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 1976). Foram realizadas determinações de massa específica aparente, índice de suscetibilidade à quebra e a percentagem de trincas dos grãos.

Para a análise do custo de secagem, considerou-se o preço do combustível de R\$ 2,55 por kg de produto (MINASGAS, 2008); preço de consumo da energia elétrica de R\$ 0,279 kWh⁻¹, na modalidade de Tarifa Rural Normal (CEMIG, 2008); período de colheita de 45 dias úteis para uma safra de 2 meses; jornada de trabalho de 22 h dia⁻¹; período para manutenção dos equipamentos de 2 h dia⁻¹.

O custo fixo foi obtido por meio de uma

ponderação no tempo de utilização do secador para a secagem de milho e de café. Considerou-se um período de utilização do secador de 2 e 3 meses para milho e café, respectivamente. Desta maneira, o custo fixo, para o milho foi aquele obtido pela equação 1 e multiplicado por 2/5. Isto foi feito para diminuir o tempo de ociosidade do secador. Para os custos de manutenção, depreciação, taxas e juros, foi considerado um percentual de 0,10 em relação ao preço inicial do sistema que foi de R\$ 24.132,00, sendo que o preço do secador rotativo com redutor, ventilador e motor elétrico foi igual a R\$ 14.703,00; o preço do sistema de aquecimento a gás foi igual a R\$ 5.000,00; e o preço do elevador tubular para carga e descarga com motor elétrico foi igual a R\$ 4.429,00 (PINHALENSE, 2008). Quanto ao custo de mão-de-obra para operação do secador, considerou-se necessária apenas uma pessoa com remuneração mensal no valor de um salário mínimo somado aos encargos sociais, totalizando-se R\$ 700,00.

O valor médio da capacidade estática dos secadores rotativos, comercial e modificado foi igual a 1260 kg de milho com teor médio de água de 18,6 % b.u. A massa específica média do produto seco foi igual a 738,7 kg m⁻³.

Com base nesses valores e no tempo médio de secagem em cada tratamento, foram estimados o tempo máximo de secagem e o volume máximo de produção anual.

Os parâmetros de custo que envolve o processo de secagem são a energia para movimentar e aquecer o ar de secagem, a mão-de-obra, os equipamentos, a manutenção, a depreciação, as taxas, seguro e juros. Na análise, Young & Dickens (1975) consideraram, separadamente, os custos energéticos de aquecimento e de movimentação do ar. Todos os outros custos foram assumidos e considerados fixos, e referem-se à depreciação dos equipamentos, manutenção, juros, seguros, impostos e mão-de-obra. O custo fixo pode ser estimado pela equação 4:

$$C_f = \frac{P_3 + P_4 \frac{F}{t_{sm}}}{\min \left[\frac{V_s}{t_s}, \frac{V_{max}}{t_{sm}} \right]} \quad (4)$$

em que

C_f = custo fixo, R\$ m⁻³;

P_3 = preço da mão-de-obra, R\$ h⁻¹;

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, m³;

t_s = tempo requerido para a secagem, h; e

V_{max} = máximo volume da produção anual, m³.

O custo de combustível pode ser estimado conforme a equação 5.

$$C_{comb} = \frac{t c p_1}{m_f 60^{-1}} \quad (5)$$

em que

C_{comb} = custo do combustível para secagem, R\$ (60 kg de produto seco)⁻¹;

T = tempo de secagem, h;

C = consumo de combustível, kg h⁻¹;

p_1 = preço do combustível, R\$ kg⁻¹;

m_f = massa final de grãos, kg;

60 = coeficiente de transformação de unidades.

O custo de operação do ventilador pode ser estimado pela equação 7.

$$C_{op} = \frac{P_{otv} t p_2}{e_2} \quad (7)$$

em que

C_{op} = custo de operação do ventilador, R\$.m⁻³;

P_{otv} = potência despendida pelo ventilador, kW m⁻³;

t = tempo de secagem, h;

p_2 = preço da eletricidade, R\$ kWh⁻¹; e

e_2 = eficiência do sistema de ventilação, 0,65.

O custo de movimentação do secador pode ser estimado pela equação 8.

$$C_{mov} = \frac{P_{otm} t_m p_2}{e_3} \quad (8)$$

em que

C_{mov} = custo de movimentação do secador, R\$ m⁻³;

P_{otm} = potência necessária para movimentar o secador, kW m⁻³;

t_m = tempo de movimentação do secador, h;

e_3 = eficiência do sistema de movimentação, 0,85.

O custo total de secagem é estimado pela soma de todos os custos (equação 9).

$$C_{total} = C_f + C_{comb} + C_p + C_{mov} \quad (9)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na análise do desempenho energético dos sistemas de secagem, referentes aos tratamentos 1, 2, 3, 4, 5 e 6, estão apresentados nos Quadros 2, 3 e 4.

Observa-se que os valores médios de fluxo de ar nos secadores rotativos, comercial e modificado, foram respectivamente iguais a 24,3 e 20,3 m³ min⁻¹ m⁻³ de produto.

Quanto à pressão estática, obteve-se um valor médio de 210 Pa (21,0 mmca) no secador rotativo comercial e 403 Pa (40,3 mmca) no secador rotativo modificado. O maior valor de pressão estática ocorrida neste secador deve-se à modificação estrutural realizada no mesmo.

Os valores médios obtidos na duração dos testes e na redução do teor de água para o secador rotativo

Quadro 2. Resultados obtidos com os testes referentes aos tratamentos 1 e 2 no secador rotativo modificado

Parâmetros	Tratamento 1			Tratamento 2		
	SM 80			SM 80 – I		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
1) Dos grãos						
Teor inicial de água, % b.u.	18,0	19,2	19,5	17,8	17,8	16,4
Teor final de água, % b.u.	12,4	11,7	13,9	12,2	12,7	12,2
Temperatura inicial, °C	24,7	26,0	27,0	18,2	21,1	23,3
Temperatura final, °C	58,7	47,9	51,4	50,7	54,9	55,3
Massa inicial, kg	1203	1257	1290	1261	1290	1236
Massa final, kg	1120	1156	1199	1178	1242	1177
2) Do ar						
Temperatura ambiente, °C	27,1	21,9	22,6	23,1	22,8	21,3
Temperatura de secagem, °C	76,8	77,3	78,5	80,6	78,5	77,9
Temperatura de exaustão, °C	33,8	26,9	27,1	28,5	29,6	30,4
Umidade relativa ambiente, %	69,3	89,9	85,0	46,3	68,6	77,4
3) Do secador						
Fluxo de ar, m ³ min ⁻¹ m ⁻³	20,5	20,9	20,5	20,1	19,8	18,7
Volume do secador, m ³	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Tempo de carregamento, h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Tempo de descarga, h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Pressão estática, mmca	40,3	34,9	40,0	42,3	43,6	47,0
4) De energia						
Tipo de combustível	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP
Massa de combustível, kg	9,6	10,1	8,1	7,8	6,9	5,7
Energia elétrica, kWh	12,0	13,6	10,4	8,7	8,7	7,1
5) Do desempenho						
Duração do teste, h	6	7	5	7	7	5
Redução do teor de água, % b.u.	5,6	7,5	6,1	5,6	5,1	4,2
5.1 Eficiência energética, kJ kg⁻¹ de água evaporada						
Incluindo energia elétrica	5.823,8	5.132,2	4.530,3	4.897,1	4.671,5	4.911,9
Excluindo energia elétrica	5.374,2	4.646,5	4.121,7	4.506,2	4.254,3	4.165,1

Quadro 3. Resultados obtidos com os testes referentes aos tratamentos 3 e 4 no secador rotativo modificado

Parâmetros	Tratamento 3			Tratamento 4		
	SM 100			SM 100 – I		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
1) Dos grãos						
Teor inicial de água, % b.u.	19,1	19,3	19,6	18,4	19,0	18,2
Teor final de água, % b.u.	11,7	11,5	11,3	11,8	12,3	11,6
Temperatura inicial, °C	23,0	22,4	27,6	20,9	20,6	21,8
Temperatura final, °C	58,3	59,7	56,5	58,5	62,5	58,2
Massa inicial, kg	1278,0	1257,0	1246,0	1280,0	1260,0	1274,0
Massa final, kg	1165,0	1146,0	1128,0	1185,0	1143,0	1170,0
2) Do ar						
Temperatura ambiente, °C	23,4	26,3	22,4	26,1	21,2	22,6
Temperatura de secagem, °C	98,3	98,8	97,5	99,1	99,6	100,1
Temperatura de exaustão, °C	30,4	30,3	30,2	31,6	28,6	29,2
Umidade relativa ambiente, %	80,0	68,0	90,0	60,2	82,3	59,8
3) Do secador						
Fluxo de ar, m ³ min ⁻¹ m ⁻³	20,6	20,6	20,5	20,6	20,5	20,6
Volume do secador, m ³	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Tempo de carregamento, h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Tempo de descarga, h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Pressão estática, mmca	38,7	39,2	39,5	39,3	40	38,8
4) De energia						
Tipo de combustível	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP
Massa de combustível, kg	10,7	10,6	10,9	9,4	9,6	9,7
Energia elétrica, kWh	10,4	10,4	10,4	8,7	8,7	8,7
5) Do desempenho						
Duração do teste, h	5	5	5	7	7	7
Redução do teor de água, % b.u.	7,4	7,8	8,3	6,6	6,7	6,6
5.1 Eficiência energética, kJ kg⁻¹ de água evaporada						
Incluindo energia elétrica	4.990,4	4.782,5	4.663,9	4.868,8	4.941,2	5.064,1
Excluindo energia elétrica	4.642,0	4.445,7	4.343,9	4.540,6	4.614,6	4.733,5

Quadro 4. Resultados obtidos com os testes referentes aos tratamentos 5 e 6 no secador rotativo comercial

Parâmetros	Tratamento 5			Tratamento 6		
	SC 80			SC 100		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
1) Dos grãos						
Teor inicial de água, % b.u.	18,7	18,7	18,7	19,3	18,3	19,1
Teor final de água, % b.u.	11,5	11,7	12,0	12,1	10,9	12,4
Temperatura inicial, °C	28,4	26,4	25,5	24,6	23,0	25,3
Temperatura final, °C	59,9	53,4	50,3	60,1	62,4	62,1
Massa inicial, kg	1242,0	1252,0	1254,0	1278,0	1262,0	1250,0
Massa final, kg	1141,0	1153,0	1153,0	1168,0	1161,0	1146,0
2) Do ar						
Temperatura ambiente, °C	28,8	22,6	23,2	24,6	27,5	23,0
Temperatura de secagem, °C	74,0	74,5	74,0	93,7	93,9	93,4
Temperatura de exaustão, °C	35,5	35,4	32,6	36,4	37,5	36,1
Umidade relativa ambiente, %	63,0	88,4	83,0	75,8	58,8	90,0
3) Do secador						
Fluxo de ar, m ³ min ⁻¹ m ⁻³	24,2	24,3	24,3	24,5	24,3	24,3
Volume do secador, m ³	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Tempo de carregamento, h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Tempo de descarga, h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Pressão estática, mmca	22,8	21,2	20,8	19,5	21,3	20,5
4) De energia						
Tipo de combustível	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP
Massa de combustível, kg	11,7	13,9	11,3	12,5	13,1	10,2
Energia elétrica, kWh	11,0	11,0	11,0	8,8	8,8	8,8
5) Do desempenho						
Duração do teste, h	4	4	4	3	3	3
Redução do teor de água, % b.u.	7,2	6,9	6,6	7,2	7,4	6,8
5.1 Eficiência energética, kJ kg⁻¹ de água evaporada						
Incluindo energia elétrica	5.800,0	6.941,7	5.982,3	5.828,5	6.126,0	5.218,6
Excluindo energia elétrica	5.406,0	6.538,0	5.562,0	5.525,0	5.821,0	4.889,0

comercial foram de 4,0 h e 6,9% b.u. e 3,0 h e 7,1% b.u. para os tratamentos 5 e 6, respectivamente. Para o secador rotativo modificado foram obtidos, respectivamente, valores médios de 6 h e 6,2% b.u.; 6,3 h e 5,0% b.u.; 5,0 h e 7,8% b.u.; e, 7,0 h e 6,6% b.u. para os tratamentos 1, 2, 3 e 4. Observa-se que os testes de menor duração foram obtidos quando se trabalhou com maior temperatura do ar de secagem para valores próximos de redução do teor de água.

Observa-se nos Quadros 2, 3 e 4 que o consumo específico médio de energia (kJ kg^{-1} de água evaporada) no secador rotativo modificado foi menor que no secador rotativo comercial, indicando que há melhor aproveitamento de energia nesse secador, pois requer menor quantidade de energia por unidade de massa de água evaporada. Este comportamento foi o mesmo verificado por Santos (2002), quando comparou o desempenho energético dos secadores rotativos, comercial e modificado na secagem de café.

O secador rotativo modificado apresentou

consumo específico de energia médio de 4.714,1; 4.308,5; 4.477,2 e 4.629,6 kJ.kg^{-1} de água evaporada para os tratamentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente, e o secador rotativo comercial apresentou consumo específico de energia médio de 5.835,3 e 5.411,7 kJ.kg^{-1} de água evaporada para os tratamentos 5 e 6, respectivamente. Comparando-se os consumos específicos de energia, entre os tratamentos 1 e 3, 5 e 6, em função das temperaturas do ar de secagem de 80 e 100 °C, observou-se menor consumo específico de energia para a temperatura do ar de secagem de 100 °C. Isto ocorreu devido ao fato do ar de secagem com temperatura de 100 °C possuir menor umidade relativa e, conseqüentemente, maior potencial de secagem.

Analisando-se os consumos específicos de energia nos tratamentos 1 e 5, para a temperatura do ar de secagem de 80 °C, observou-se que houve melhor aproveitamento de energia no secador rotativo modificado. Na Figura 3, verifica-se que a eficiência energética no secador rotativo modificado

Quadro 5. Susceptibilidade à quebra, percentagem dos tipos de trincas e massa específica aparente do produto obtidos após a secagem no secador modificado, relativo aos tratamentos 1, 2, 3 e 4

Parâmetros	Tratamento 1			Tratamento 2			Tratamento 3			Tratamento 4		
	SM 80			SM 80 - I			SM 100			SM 100 - I		
	Teste			Teste			Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
S. Q.	Susceptibilidade à quebra, %											
	1,1	1,5	1,1	1,2	1,3	1,2	3,5	4,2	2,0	1,4	2,3	2,1
Zero Simples D u p l a s o u múltiplas Total	Índices de trincas, %											
	8,6	19,2	74,1	40,7	64,5	64,3	22,6	7,7	36,3	50,9	19,0	22,3
	16,8	23,1	10,2	29,7	20,9	23,2	23,5	14,0	17,6	12,1	20,4	20,2
	74,6	57,7	15,7	29,7	14,5	12,5	53,9	78,3	46,1	37,0	60,6	57,5
	91,4	80,8	25,9	59,3	35,5	35,7	77,4	92,3	63,7	49,1	81,0	77,7
Inicial Final	Massa específica aparente, kg m^{-3}											
	695,5	694,0	698,7	707,6	706,3	712,5	690,5	689,3	682,2	696,1	689,5	698,9
	733,4	736,6	735,5	739,4	742,8	740,2	734,0	739,0	738,6	726,3	727,6	737,2

Quadro 6. Susceptibilidade à quebra, percentagem dos tipos de trincas e massa específica aparente do produto obtidos após a secagem no secador comercial, relativo aos tratamentos 5 e 6

Parâmetros	Tratamento 5			Tratamento 6		
	SC 80			SC 100		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
S.Q.	Susceptibilidade à quebra, %					
	1,2	1,3	1,2	1,7	2,2	1,6
	Índices de trincas, %					
Zero	8,2	20,8	62,7	36,2	15,3	4,2
Simplex	19,9	32,9	22,0	25,1	24,9	20,1
Duplas ou múltiplas	71,9	46,4	15,3	38,7	59,8	75,6
Total	91,8	79,2	37,3	63,8	84,7	95,8
	Massa específica aparente, kg m ⁻³					
Inicial	693,3	647,1	696,0	683,6	702,1	689,0
Final	740,2	745,0	747,1	743,2	744,6	746,3

Quadro 7. Resultados experimentais de custo de combustível, operação do ventilador, movimentação do secador, custo fixo e custo total de secagem no secador rotativo modificado

Componentes de custo	Tratamento 1			Tratamento 2		
	SM 80			SM 80 – I		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
	Custos (R\$/60 kg)					
Combustível	1,31	1,34	1,03	1,01	0,87	0,74
Operação do ventilador	0,16	0,18	0,13	0,10	0,10	0,08
Movimentação do secador	0,006	0,007	0,005	0,004	0,004	0,003
Custos fixos	0,83	0,91	0,75	0,93	0,92	0,77
Total	2,31	2,44	1,92	2,04	1,89	1,59

Quadro 8. Resultados experimentais de custo de combustível, operação do ventilador, movimentação do secador, custo fixo e custo total de secagem no secador rotativo modificado

Componentes de custo	Tratamento 3			Tratamento 4		
	SM 100			SM 100 – I		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
	Custos (R\$/60 kg)					
Combustível	1,40	1,41	1,48	1,21	1,26	1,26
Operação do ventilador	0,13	0,13	0,13	0,11	0,11	0,10
Movimentação do secador	0,005	0,005	0,005	0,004	0,004	0,004
Custos fixos	0,78	0,77	0,77	0,97	0,97	0,96
Total	2,32	2,32	2,39	2,29	2,34	2,32

Quadro 9. Resultados experimentais de custo de combustível, operação do ventilador, movimentação do secador, custo fixo e custo total de secagem no secador rotativo comercial

Componentes de custo	Tratamento 5			Tratamento 6		
	SC 80			SC 100		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
	Custos (R\$/60 kg)					
Combustível	1,57	1,84	1,50	1,63	1,73	1,35
Operação do ventilador	0,10	0,10	0,09	0,07	0,09	0,07
Movimentação do secador	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
Custos fixos	0,55	0,55	0,55	0,43	0,43	0,43
Total	2,27	2,54	2,18	2,17	2,29	1,89

foi maior que no secador rotativo comercial. Nota-se que a entalpia específica aumenta durante a secagem do produto, ou seja, na fase final da secagem é necessário mais energia para evaporar a água do grão.

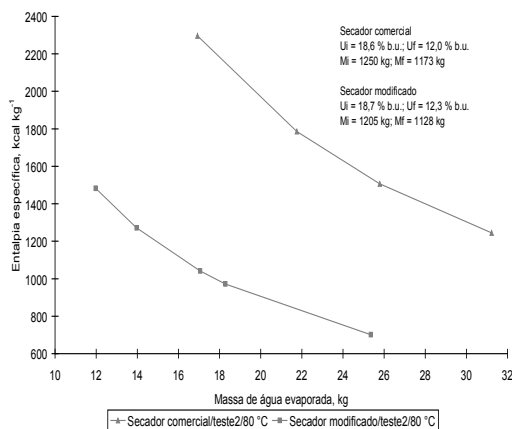


Figura 3. Variação da eficiência energética em função da massa de água evaporada, durante a secagem nos secadores rotativos, comercial e modificado, no teste 2, tratamentos 5 e 1.

Comparando-se os tratamentos 1 com 5 e 3 com 6, observa-se que os consumos totais de energia elétrica no secador rotativo modificado foram respectivamente, 9,1 e 18,2% maiores que no secador rotativo comercial. Isto se deve ao fato de o tempo médio de secagem no secador modificado ter sido maior. Deve-se ressaltar que o consumo médio de energia elétrica para movimentar os grãos no secador rotativo comercial foi 9,94 vezes maior que no secador modificado. Isto ocorreu devido às modificações ocorridas no mesmo, proporcionando que a movimentação dos grãos fosse realizada

apenas em intervalos de tempo de 5 min (0,083 h).

Constam, nos Quadros 5 e 6, os resultados da susceptibilidade à quebra, dos índices de trincas e da massa específica aparente do produto.

Os resultados dos índices de susceptibilidade à quebra, em todos os testes, foram inferiores a 5%. De acordo com Silva et al. (2000), índices de susceptibilidade à quebra semelhantes aos obtidos nesse estudo indicam boa técnica de manuseio do secador. Observa-se, também, que os índices de susceptibilidade dos grãos à quebra foram relativamente maiores quando foram utilizadas temperaturas do ar de secagem mais elevadas. Isto foi verificado, também, por Sabioni (1986), Franceschini et al. (1996) e Alves et al. (2001).

Os valores médios de percentagens totais de trincas do milho, obtidos após a secagem no secador rotativo comercial, foram iguais a 69,4 e 81,4%, respectivamente nos tratamentos 5 e 6. No secador rotativo modificado, as médias de percentagens totais de trincas do produto, foram iguais a 66,0; 43,5; 77,8; e 69,3%, nos tratamentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Embora esses percentuais de trincas encontradas após secagem nos dois secadores rotativos tenham sido elevados, observa-se que eles foram inferiores às percentagens de trincas apresentadas por Sabioni (1986) que foram, respectivamente, iguais a 72 e 86% para as temperaturas do ar de secagem de 80 e 100 °C.

Comparando-se os tratamentos 1 com 5 e 3 com 6, observaram-se que as percentagens totais de trincas no secador rotativo comercial foram 5,1 e 4,6% maiores que no secador rotativo modificado, para as temperaturas do ar de secagem de 80 e 100

°C respectivamente. Em comparação com o secador modificado, a maior movimentação dos grãos pelo secador comercial pode ter contribuído para o aumento de trincas no produto.

Quanto à massa específica aparente do produto, observou-se que houve um aumento da massa específica aparente do milho em função da redução de seu teor de água. Este fato foi também verificado por Brooker *et al.*, (1992). Isto mostra que durante a redução do teor de água do milho, o seu volume é reduzido mais rapidamente que a sua massa total. Este comportamento está coerente com o esperado, uma vez que é o mesmo observado para maioria dos produtos agrícolas, com exceção do café, arroz em casca e cevada.

Nos Quadros 7, 8 e 9 são apresentados os resultados experimentais obtidos na análise de custo dos sistemas de secagem.

Observa-se, nos Quadros 7, 8 e 9, em todos os tratamentos, que as parcelas de custos mais elevadas foram os custos fixos e os custos de combustível. Com relação aos custos fixos, esse fato ocorreu devido às pequenas capacidades estáticas e de secagem dos secadores rotativos estudados. Além disto, o custo com a mão-de-obra, que pela metodologia adotada, é parte do custo fixo, tornou este custo mais elevado. Deve-se ressaltar que o custo fixo pode ser reduzido, significativamente, caso se aumente a capacidade estática dos secadores, o que implica, também, na redução do custo operacional. O elevado custo com o combustível deve-se, principalmente, ao elevado preço do mesmo e às altas taxas de consumo de GLP pelos geradores de calor a gás.

Comparando-se o custo de combustível entre os tratamentos 1 e 5 (temperatura do ar de secagem de 80 °C) e os tratamentos 3 e 6 (temperatura do ar de secagem de 100 °C), apresentado nos Quadros 7, 8 e 9, verifica-se que o custo de combustível foi, respectivamente, 25,1 e 8,9% menor no secador rotativo modificado. Quanto ao custo total de secagem, comparando-se os tratamentos 1 e 5, 3 e 6, nota-se que o custo total foi, respectivamente, 4,6% menor no secador modificado e 10,7% menor no secador comercial.

O custo de secagem de milho, com teor inicial de água de 16,01 a 20,0% b.u. informado pela CONAB (2006), foi de aproximadamente R\$ 0,63 por 60 kg de produto seco. Este valor é, em média, 72,0% menor que os custos totais de secagem apresentados nos Quadros 7, 8 e 9, referentes aos

tratamentos 1, 3, 5 e 6. Isto se deve ao fato de a capacidade estática dos secadores utilizados para o cálculo do custo de secagem da CONAB (2006), que é de 80 toneladas, serem muito superiores que os secadores rotativos estudados.

Observa-se no Quadro 9, para o secador rotativo comercial, que o custo total foi 9,16% menor quando se elevou a temperatura do ar de secagem. Isto foi observado, também, por Young & Dickens (1975), Octaviani (2000) e Portella & Eichelberger (2001). Já nos Quadros 7 e 8, para o secador rotativo modificado, nota-se que isto não ocorreu, ou seja, o custo total não diminuiu quando se elevou a temperatura do ar de secagem.

CONCLUSÕES

Considerando-se os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- o consumo específico médio de energia no secador rotativo modificado (SM 80 e SM 100) foi menor que no secador rotativo comercial (SC 80 e SC 100);
- o secador rotativo modificado, operando de forma intermitente, apresentou o menor consumo específico de energia;
- os índices de susceptibilidade à quebra do milho, obtido após a secagem nos secadores rotativo, comercial e modificado foram baixos em comparação com os obtidos em outros tipos de secadores, citados na literatura;
- a percentagem média de trinca total do milho no secador comercial (SC 80 e SC 100) foi superior àquela obtida com o secador modificado (SM 80 e SM 100); e
- o custo total médio de secagem foi menor no secador comercial (SC 80 e SC 100) em comparação com o secador modificado (SM 80 e SM 100).

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, pela disponibilidade de infra-estrutura para a formação de pessoal em nível de Pós Graduação em Engenharia Agrícola. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos. À SHV Gás Brasil e à Drumond Tubulações, por terem fornecido, respectivamente,

o combustível e o sistema de aquecimento. À Empresa Rio Branco Alimentos (Pif-Paf), por ter cedido os grãos de milho para a realização do experimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, W. M.; FARONI, L. R. D'A.; QUEIROZ, D. M.; CORRÊA, P. C.; GALVÃO, J. C. C. Qualidade dos grãos de milho em função da umidade de colheita e da temperatura de secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.5, n.3, p.469-474, 2001.

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); BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Especificações para a padronização, classificação e comercialização interna do milho (*Zea mays* L.), 1976. <http://www.agricultura.gov.br>. 02 abr. 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Regras para análise de sementes. Brasília: DNPOVDISEM, 1992. 365 p.;

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.H. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 450p.

CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. <http://www.cemig.com.br>. 21 set. 2008.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: Segundo Levantamento da Safra 2009/2010. 39p. <http://www.conab.gov.br>. 16 nov. 2009.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Central de Informações Agropecuárias. www.conab.gov.br/conabweb/index.php?PAG=156. 25 jun. 2006.

COSTA, E. C. **Compressores**. São Paulo – SP: Ed. Edgard Blucher, 172 p.1978.

FRANCESCHINI, A. S.; MARTINS, J. H.;

CORREA, P. C.; FARONI, L. R. D'A.; CECOM, P. R. Avaliação da qualidade do Milho BR-201 submetido a diferentes condições de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.21, n.1/2, p.13-16, 1996.

FREIRE, A. T. **Projeto e avaliação de um sistema de secagem combinado de café (*Coffea arabica* L.) despulpado**. Viçosa: UFV, 1998. 98p. (Dissertação de mestrado).

LACERDA FILHO, A. F de. **Avaliação de uma unidade de beneficiamento de sementes de milho (*Zea Mays*, L.)**. Botucatu: UNESP, 1998. 198p. (Tese de doutorado).

LOPES, R. P. AFONSO, A. D. L., SILVA, J. de S. Energia no pré-processamento de produtos agrícolas. In: SILVA, J. de S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa, MG: 1ª ed. Aprenda fácil, 2000. 502 p.

MINASGAS. <http://www.minasgas.com.br>. 10 out. 2008.

OCTAVIANI, J.C. **Secagem de café cereja descascado desmucilado com utilização de gás liquefeito de petróleo**. Campinas: UNICAMP, 2000. 92p. (Dissertação de mestrado). PINHALENSE. <http://www.pinhalse.com.br>. 15 out. 2008.

PORTELLA, J. A.; EICHELBERGER, L. **Uso de gás liquefeito de petróleo na secagem estacionária de milho em secador de leito fixo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001. 4p. html. (Embrapa Trigo Comunicado Técnico Online, 64). http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_co64.htm. 20 jun. 2006.

REINATO, C. H. R.; VILELA, E. R.; CARVALHO, F. M.; MEIRELES, E. de P. Consumo de energia e custo de secagem de café cereja em propriedades agrícolas do Sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.112-116, 2002.

SABIONI, P. M. **Projeto e avaliação de um secador de fluxos cruzados, intermitente e com reversão do fluxo de ar, na secagem de milho (*Zea mays* L.)**. Viçosa: UFV, 1986. 106 p. (Dissertação de mestrado).

SANTOS, R. R. **Modificação e avaliação de um secador rotativo horizontal, com distribuição radial do fluxo de ar, para secagem de café**. Viçosa: UFV, 2002. 62 p. (Dissertação de mestrado).

SILVA, J. de S., BERBERT, P. A., AFONSO, A. D. L., RUFATO, S. Qualidade dos grãos. In: SILVA, J. de S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa, MG: 1ª ed. Aprenda fácil, 2000. 502 p.

YOUNG, J.H., DICKENS, J.W. Evaluation of costs for drying grain in batch of cross-flow systems. **Transactions of ASAE**, v.18, n.4, p.734-738, 1975.