

Douglas Romeu da Costa <sup>1</sup>, Adílio Flauzino de Lacerda Filho <sup>2</sup>, Juarez de Sousa e Silva <sup>3</sup>, Daniel Marçal de Queiroz <sup>4</sup>  
Juliana Pinheiro Dadalto <sup>5</sup>

### 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 a qualidade final 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. Milho em grãos (*Zea mays* L.), com teor inicial de água de aproximadamente 19,5% 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. As modificações técnicas realizadas no gerador de calor a gás, proporcionaram redução média no consumo de combustível em aproximadamente 50%. A susceptibilidade à quebra do produto foi inferior a 5%. A percentagem média de trinca total do milho no secador comercial foi 17,6% superior àquela obtida com secador modificado.

**Palavras-chave:** Energia, secador mecânico, qualidade.

### ABSTRACT

#### ENERGY CONSUMPTION ANALYSIS OF A SYSTEM OF DRYING OF MAIZE IN MECHANICAL DRYER

The objective of this work was to analyze the feasibility of drying corn (*Zea mays* L.) with rotary dryers with radial air distribution, generally used for coffee drying, by evaluating the energy consumption and corn quality. The drying air temperature was maintained at 80 and 100 °C. The drying systems consisted of a commercial rotary dryer and a modified dryer. Liquid petroleum gas was used to heat air. Corn grains with initial moisture content of about 19.5% w.b. were used in the experiment. The specific energy consumption and consumption of fuel and electricity were determined to evaluate energy efficiency of the drying system. The results showed lower specific energy consumption for the modified rotary dryer. The technical modifications carried out in the gas heat generator, reduced mean fuel consumption by about 50%. The breakage susceptibility of the grains was below 5%. The mean percentage of total cracking in the commercial dryer was 17.6% higher than that obtained with the modified dryer.

**Keywords:** Energy, mechanical dryer, quality.

---

#### Recebido para publicação em 01/10/2007. Aprovado em 21/12/2009

1- Engenheiro Agrícola e Ambiental, Doutorando em Engenharia Agrícola/UFV, 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- Engenheira Agrícola e Ambiental, Dep. de Eng. Agrícola, UFV, Julianadadalto@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 e que mantenham a qualidade dos grãos.

Brooker et al. (1992) afirmaram que, na sequência 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%.

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 não o têm utilizado para a secagem desse cereal devido ao desconhecimento da possibilidade de uso e pelo fato deste produto apresentar menor valor unitário em relação ao café. Deve-se ressaltar que nenhum trabalho até o momento mostrou a utilização do secador rotativo para a secagem desse produto.

Santos (2002), estudando a modificação e avaliação de um secador rotativo horizontal com distribuição radial do fluxo de ar, para secagem de café, concluiu que o consumo específico de energia e o consumo de energia elétrica foi 92% menor para o secador modificado em comparação ao secador comercial. Verificou também que a qualidade final do produto foi igual para os dois secadores.

Octaviani (2005), secando café cereja descascado e desmucilado com teores médios inicial e final de água de 47,6 e 12,3% b.u., em secador rotativo com capacidade estática igual a 7,5m<sup>3</sup>, obteve consumos médios de GLP que variaram de 7,6 a 10,25 kg de gás por hora para o tempo médio de secagem de 33 e 30 h, respectivamente.

Portella & Eichelberger (2001), estudando o

desempenho de um secador estacionário de leito fixo, utilizando-se gás liquefeito de petróleo em secagens de milho com teor inicial e final de água de 18 e 13% b.u., massa inicial de grãos de 1400 kg e temperaturas do ar de secagem de 40, 70 e 100 °C obtiveram, respectivamente, consumos de GLP de 0,73; 1,64 e 2,03 kg h<sup>-1</sup>.

Bakker-Arkema (1999) comentou sobre a dificuldade em se definir os parâmetros necessários para estabelecer a qualidade dos grãos, devido os diferentes conceitos apresentados em função do uso final do produto. Os criadores de animais domésticos priorizam o valor nutritivo e os produtores de sementes se importam pela viabilidade. Os processadores de cereais se interessam pelas propriedades físicas e químicas do produto, tais como a susceptibilidade à quebra e trincas, o teor de água, massa específica aparente, os índices de danos (mecânicos, físicos e biológicos), o valor nutritivo como proteínas, energia, vitaminas, contaminação por aflatoxina, resíduos, teor de impurezas e odores deixados por insetos, roedores e pássaros, dentre outros.

Franceschini et al. (1996) analisaram a qualidade do milho BR-201 submetido à secagem em secador protótipo de camada delgada. Utilizaram-se quatro níveis de temperatura do ar de secagem (40, 60, 80 e 100 °C) e quatro níveis de teor inicial de água (27, 25, 23 e 21% b.u.). Concluíram que o aumento da temperatura do ar de secagem e do teor inicial de água dos grãos proporcionou aumento do índice de suscetibilidade à quebra.

Portella & Eichelberger (2001) afirmaram que sistemas de secagem que utilizam combustíveis líquidos ou gasosos, como o gás liquefeito de petróleo (GLP) e gás natural (GN), oferecem vantagens como a simplicidade de operação e o controle de temperatura, favorecendo a automação da secagem.

O principal problema quanto ao uso do GLP reside na adaptação dos mecanismos de queima, considerando-se que, em muitos casos, os sistemas secador-gerador de calor não apresentam desempenhos aceitáveis.

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 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; avaliar

o sistema complementar de aquecimento do ar, com a queima de GLP e a qualidade do produto final.

## 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 produzido no município de Viçosa, Minas Gerais. Foi realizada a colheita mecânica de, aproximadamente, 30 toneladas de milho com teor inicial de água de 20% b.u. e testes experimentais aconteceram entre os meses de abril e junho de 2006. 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.

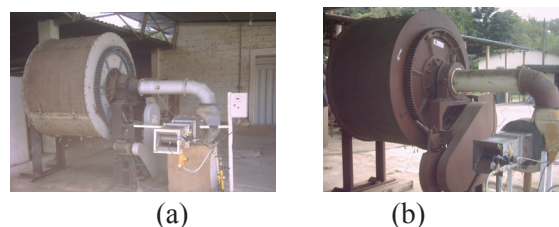
O aquecimento do ar de secagem, nos dois secadores, foi realizado por meio de geradores de calor a gás (Figura 3), fornecidos por uma distribuidora do produto.

O experimento foi caracterizado pelos tratamentos apresentados no Quadro 1.

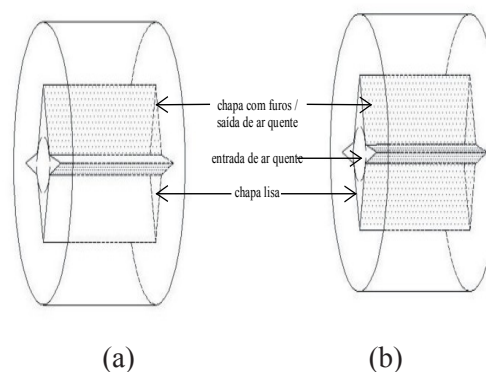
**Quadro 1.** Descrição dos tratamentos dos sistemas de secagem

Tratamento	Temperatura do ar de secagem (°C)	Sistema de ventilação	Movimentação dos grãos	Tipo de secador <sup>(1)</sup>
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 h 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

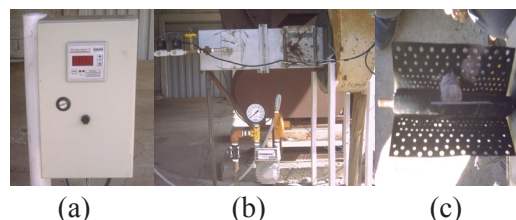
(1) SM e SC referem-se aos secadores rotativos, modificado e comercial. Os números referem-se às temperaturas do ar de secagem.



**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: forma original (a) e modificação no sistema de distribuição de ar, nos difusores do secador (b), (solicitação de patente protocolada).



**Figura 3.** Detalhes do gerador de calor que compõe os secadores rotativos: painel de controle de temperatura (a), câmara de combustão e medidor LAO (b) e o bico de gás (c).

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.

A movimentação da massa de grãos no secador comercial foi feita continuamente, do início ao final da secagem. No sistema modificado, a movimentação dos grãos foi realizada em intervalos regulares de 5 minutos para cada intervalo de repouso de 1 hora (Quadro 1). Conforme Santos (2002), este procedimento foi adotado após avaliações prévias da mistura da massa de grãos, no sentido de minimizar os gradientes de temperatura e teor de água dos grãos, em relação à espessura da massa. Para este volume de produto e considerando-se as características mecânicas do sistema, o tempo de 5 minutos de revolvimento teve o mesmo efeito que 60 minutos, sem o comprometimento da qualidade final do produto.

O sistema de ventilação, no secador comercial, 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 operou também com o sistema de ventilação ligado em tempo integral (Quadro 1).

Foram feitas algumas alterações no gerador de calor a gás original (Figuras 4a e 4b) visando melhorar suas características quanto à forma e cor da chama, acendimento da chama piloto e redução no consumo de gás. As modificações consistiram em aumentar a câmara de combustão e as entradas de ar secundário do gerador de calor a gás.

O gerador de calor a gás original era formado por uma câmara de combustão de 0,245 x 0,245 x 0,385 m, com entradas de ar secundário de dimensões iguais a 0,07 x 0,14 m, com regulagem manual, um bico para saída de gás e um painel de controle de temperatura. Após as modificações, o gerador de calor a gás passou a ter uma câmara de combustão de 0,245 x 0,245 x 0,75 m e aberturas de ar secundário equipadas com registros do tipo gaveta, com regulagem manual, de dimensões iguais a 0,15 x 0,2 m.

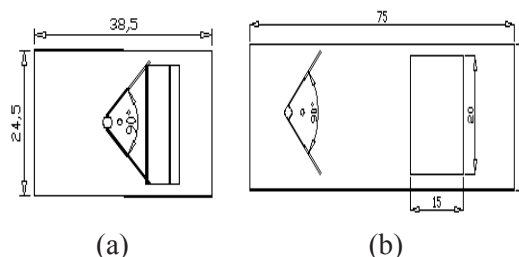
A umidade relativa do ar ambiente foi monitorada por meio de um termohigrógrafo e um psicrômetro, instalados em um abrigo meteorológico, anexo à área experimental. A umidade relativa do ar de secagem foi calculada por meio de um programa de

simulação – GRAPSI, desenvolvido por Melo et al. (2004), com base nas variáveis iniciais do ar ambiente e na temperatura do ar de secagem.

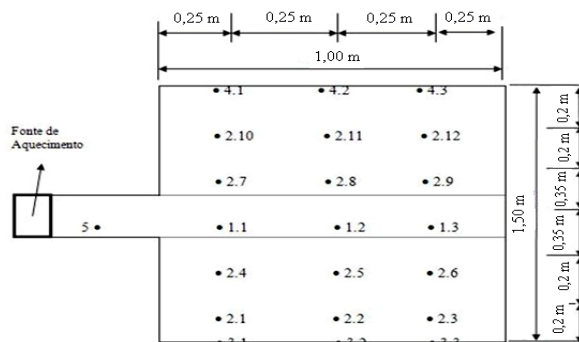
O teor de água dos grãos foi monitorado por meio de estufa, com circulação forçada de ar, à temperatura de  $105 \pm 3$  °C, durante 24 horas (BRASIL, 1992) e, para o acompanhamento efetivo da secagem, utilizou-se o aparelho MOTOMCO, modelo 919®, conforme o manual de operações.

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 da massa de grãos, na câmara de secagem, foram medidas com o sistema de ventilação desligado. Na Figura 5 ilustram-se os pontos onde foram instalados os sensores termoeletrônicos para o monitoramento de temperatura da massa de grãos, do ar de secagem e do ar de exaustão.



**Figura 4.** Croqui: gerador de calor a gás original (a) e modificado (b)



**Figura 5.** Pontos de monitoramento das temperaturas do ar de secagem (1); massa de grãos (2); ar de exaustão (3 e 4) e da pressão estática (5).

O monitoramento de temperatura foi realizado continuamente, entretanto, foram considerados os valores anotados em intervalos regulares de 1 hora. As temperaturas do ar de secagem foram mantidas em  $80 \pm 4$  °C e  $100 \pm 4$  °C.

A vazão do ar de secagem foi obtida a partir da curva característica do ventilador, conforme Costa (1978).

A pressão estática, devido às perdas de cargas relativas ao processo de secagem, foi monitorada, continuamente, por meio de um manômetro diferencial. Os resultados foram apresentados em valores médios resultantes das leituras realizadas no ponto 5 (Figura 5), em intervalos regulares de 1 hora.

Estimou-se a energia necessária para o aquecimento do ar de secagem considerando-se o poder calorífico inferior do combustível. O consumo específico de energia real foi determinado por meio da equação 1, conforme Freire (1998).

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

em que

CEE= consumo específico real de energia, (kJ kg<sup>-1</sup> de água evaporada);

PCI=poder calorífico inferior do combustível, (kJ kg<sup>-1</sup>);

c=consumo de GLP, (kg h<sup>-1</sup>);

t=tempo total de secagem, (h);

M=massa inicial do produto, (kg);

U<sub>i</sub>= teor inicial de água do produto, (% b.u.); e

U<sub>f</sub> = teor final de água do produto, (% b.u.)

O uso da eletricidade foi estimado com base na potência dos motores utilizados para as operações de carga e descarga dos secadores, movimentação dos grãos e do ar e no tempo efetivo de operação.

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 m<sup>3</sup>, marca FAMABRAS, instalado no secador comercial.

Os resultados de consumo de GLP foram expressos em unidades de massa, considerando-se as medidas observadas em kg h<sup>-1</sup> e m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, respectivamente, para os secadores modificado e comercial e a massa específica, para a temperatura do gás, conforme as informações contidas no Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2006) e por meio de informações

da empresa distribuidora do combustível.

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). Determinou-se a massa específica aparente, o índice de suscetibilidade à quebra e a percentagem de trincas dos grãos.

A massa específica aparente do milho foi determinada utilizando-se uma balança de peso hectolítrico de 0,25 L, com duas repetições para cada amostra.

O índice de susceptibilidade à quebra do milho foi determinado utilizando-se o aparelho Stein Breakage Tester, modelo CK2. Uma amostra de 0,100 kg de grãos limpos foi colocada em um recipiente de aço de nove centímetros de diâmetro que, a uma rotação de 1.725 rpm, movimentava os grãos contra a parede do recipiente durante dois minutos. Em seguida, a amostra foi retirada do aparelho e passada em peneira de crivos circulares de 4,76 mm de diâmetro. Todo material que passou pela peneira foi pesado e o percentual de grãos quebrados foi expresso em relação à massa inicial da amostra.

As percentagens dos tipos de trincas, subdivididas em zero, simples, duplas e várias, foram determinadas por meio da verificação visual em um diafanoscópio. Realizaram-se cinco repetições para cada amostra do produto final, tendo sido verificado 50 grãos de milho escolhidos ao acaso, em cada repetição.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

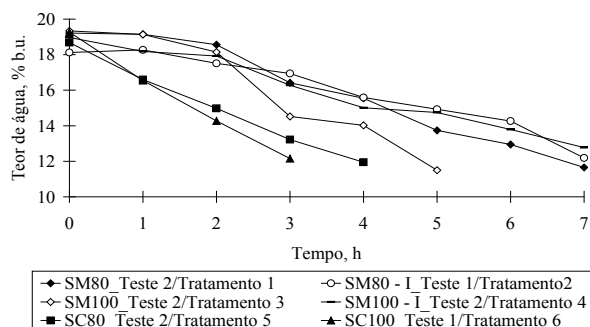
Na Figura 6 ilustra-se a variação do teor de água do produto durante o processo de secagem. Os teores iniciais e finais de água do milho variaram para cada teste. Considerando-se as curvas de secagem apresentadas, os valores médios dos teores iniciais e finais de água foram  $18,6 \pm 0,8$  e  $12,9 \pm 0,7$ % b.u., para o secador rotativo modificado e,  $19,0 \pm 0,3$  e  $12,1 \pm 0,1$ % b.u., para o secador rotativo comercial.

Comparando-se as curvas de secagem nos dois secadores, nota-se que a taxa de secagem, redução de massa de água na unidade de tempo, no secador rotativo comercial foi maior do que no secador rotativo modificado. As taxas de remoção de água do milho foram iguais a 1,1; 0,8; 1,6 e 1,0 pontos percentuais por hora, no secador modificado e, 1,7 e 2,4 pontos percentuais por hora, no secador

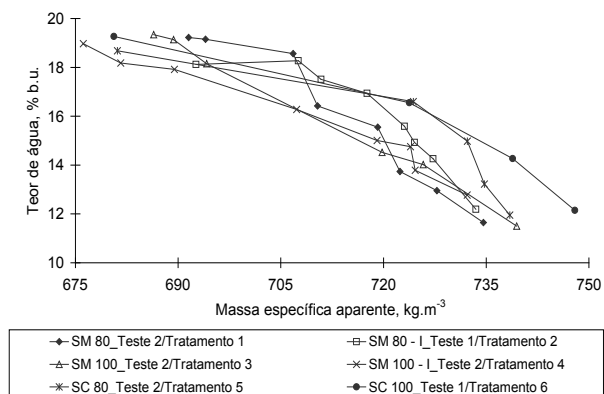
comercial. Verifica-se, também, que a taxa de secagem se elevou com o aumento da temperatura do ar de secagem.

Esses valores de taxa de secagem são considerados baixos quando comparados com àqueles, para que não proporcionem perda de qualidade do produto, recomendados por Brooker et al. (1992) que foi de 4 a 5 pontos percentuais por hora.

A variação da massa específica aparente do milho em função de seu teor de água está representada na Figura 7.



**Figura 6.** Variação do teor de água do milho em função do tempo, durante a secagem, no secador rotativo modificado (teste 1, tratamento 2 e teste 2, tratamentos 1, 3 e 4) e no secador rotativo comercial (teste 2, tratamento 5 e teste 1, tratamento 6).



**Figura 7.** Variação da massa específica aparente do milho em função do teor de água, durante a secagem no secador rotativo modificado (teste 1, tratamento 2 e teste 2, tratamentos 1, 3 e 4) e no secador rotativo comercial (teste 2, tratamento 5 e teste 1, tratamento 6).

Observa-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 Hall (1972) e 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 de café, arroz em casca e cevada.

Comparando-se os valores finais de massa específica aparente com as temperaturas do ar de secagem e valores próximos de teor de água, observa-se que o valor mais elevado foi obtido quando se utilizou maior temperatura do ar de secagem.

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.

Verifica-se que os valores médios de fluxo de ar nos secadores rotativos, comercial e modificado, foram respectivamente iguais a 24,3 e 20,3 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup> 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 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. Nota-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.

Verifica-se, nos Quadros 2, 3 e 4, que o consumo específico médio de energia (kJ kg<sup>-1</sup> de água evaporada) no secador rotativo comercial foi maior que no secador rotativo modificado. Isto mostra que existe melhor aproveitamento de energia no secador modificado, 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 (excluindo energia elétrica) de 4.714,1; 4.308,5; 4.477,2 e 4.629,6 kJ kg<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup> 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, em consequência, maior potencial de secagem.

Quanto à forma de operação do secador rotativo modificado, verificou-se que o consumo específico de energia foi ligeiramente menor, quando o mesmo operou de maneira intermitente, considerando-se a

**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
<b>1) Dos grãos</b>						
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 específica inicial, kg m <sup>-3</sup>	695,5	694,0	698,7	707,6	706,3	712,5
Massa específica final, kg m <sup>-3</sup>	733,4	736,6	735,5	739,4	742,8	740,2
Massa inicial, kg	1203	1257	1290	1261	1290	1236
Massa final, kg	1120	1156	1199	1178	1242	1177
<b>2) Do ar</b>						
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
<b>3) Do secador</b>						
Fluxo de ar, m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup>	20,5	20,9	20,5	20,1	19,8	18,7
Volume do secador, m <sup>3</sup>	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
<b>4) De energia</b>						
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
<b>5) Do desempenho</b>						
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
<b>5.1 Eficiência energética, kJ kg<sup>-1</sup> de água evaporada</b>						
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
Média por tratamento (sem energia elétrica)	4.714,1			4.308,5		

**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
<b>1) Dos grãos</b>						
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 específica inicial, kg m <sup>-3</sup>	690,5	689,3	682,2	696,1	689,5	698,9
Massa específica final, kg m <sup>-3</sup>	734,0	739,0	738,6	726,3	727,6	737,2
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
<b>2) Do ar</b>						
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
<b>3) Do secador</b>						
Fluxo de ar, m <sup>3</sup> . min <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup>	20,6	20,6	20,5	20,6	20,5	20,6
Volume do secador, m <sup>3</sup>	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
<b>4) De energia</b>						
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
<b>5) Do desempenho</b>						
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
<b>5.1 Eficiência energética, kJ kg<sup>-1</sup> de água evaporada</b>						
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
Média por tratamento (sem energia elétrica)	4.477,2			4.629,6		



**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
<b>1) Dos grãos</b>						
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 específica inicial, kg m <sup>-3</sup>	693,3	647,1	696,0	683,6	702,1	689,0
Massa específica final, kg m <sup>-3</sup>	740,2	745,0	747,1	743,2	744,6	746,3
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
<b>2) Do ar</b>						
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
<b>3) Do secador</b>						
Fluxo de ar, m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup>	24,2	24,3	24,3	24,5	24,3	24,3
Volume do secador, m <sup>3</sup>	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
<b>4) De energia</b>						
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
<b>5) Do desempenho</b>						
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
<b>5.1) Eficiência energética, kJ kg<sup>-1</sup> de água evaporada</b>						
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
Média por tratamento (sem energia elétrica)	5.835,3			5.411,7		

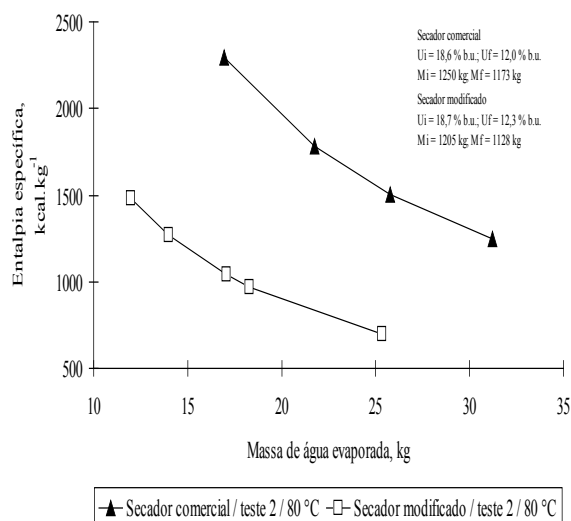
mesma temperatura de secagem.

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. Analisando-se a Figura 8, verifica-se a confirmação desse comportamento, na qual se observa que a eficiência energética no secador rotativo modificado 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.

Nos Quadros 5, 6 e 7, são apresentados os resultados de consumo de energia elétrica para a carga, descarga, movimentação do ar e do produto nos secadores.

Analisando-se os Quadros 5, 6 e 7, verifica-se que o consumo médio de energia elétrica para movimentar os grãos no secador rotativo comercial foi 9,94 vezes maior que no secador rotativo modificado. Isto era esperado, uma vez que, devido às modificações ocorridas no mesmo, a movimentação dos grãos

passou a ser realizada em intervalos de tempo regulares, 5 minutos a cada hora (ver Quadro 1).



**Figura 8.** 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.

**Quadro 5.** Consumo de energia elétrica (kWh), no secador rotativo modificado, referente aos tratamentos 1 e 2, considerando os testes 1, 2 e 3

Parâmetros (kWh)	Tratamento 1			Tratamento 2		
	SM 80			SM 80 – I		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
Energia para movimentar o grão	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2
Energia para movimentar o ar	9,4	11,0	7,9	6,3	6,3	4,7
* Energia para o carregamento	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
* Energia para descarga	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Consumo total de energia elétrica	12,0	13,6	10,4	8,7	8,7	7,1

\* O tempo médio de carga e descarga dos secadores foi de 0,5 hora.

**Quadro 6.** Consumo de energia elétrica (kWh), no secador rotativo modificado, referente aos tratamentos 3 e 4, considerando os testes 1, 2 e 3

Parâmetros (kWh)	Tratamento 3			Tratamento 4		
	SM 100			SM 100 – I		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
Energia para movimentar o grão	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
Energia para movimentar o ar	7,9	7,9	7,9	6,3	6,3	6,3
* Energia para o carregamento	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
* Energia para descarga	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Consumo total energia elétrica	10,4	10,4	10,4	8,7	8,7	8,7

**Quadro 7.** Consumo de energia elétrica (kWh), no secador rotativo comercial, referente aos tratamentos 5 e 6, considerando os testes 1, 2 e 3

Parâmetros (kWh)	Tratamento 5			Tratamento 6		
	SC 80			SC 100		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
Energia para movimentar o grão	3,0	3,0	3,0	2,3	2,3	2,3
Energia para movimentar o ar	5,8	5,8	5,8	4,4	4,4	4,4
* Energia para o carregamento	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
* Energia para descarga	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Consumo total energia elétrica	11,0	11,0	11,0	8,8	8,8	8,8

**Quadro 8.** Susceptibilidade à quebra do produto, em percentagem, nos tratamentos 1, 2, 3,4

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.	1,1	1,5	1,1	1,2	1,3	1,2	3,5	4,2	2,0	1,4	2,3	2,1

**Quadro 9.** Susceptibilidade à quebra do produto, em percentagem, nos tratamentos 5, 6

Parâmetros	Tratamento 5			Tratamento 6		
	SC 80			SC 100		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
S.Q.	1,2	1,3	1,2	1,7	2,2	1,6

Comparando-se os tratamentos 1 com 5 e 3 com 6, nota-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 de secagem no secador modificado ter sido maior.

O consumo de gás, obtido após teste preliminar com o gerador de calor a gás original, foi de 5 a 6 kg h<sup>-1</sup>. Com as modificações realizadas no gerador de calor a gás, os consumos médios de GLP foram iguais a 1,5; 1,9; 2,2; 2,4; 3,1 e 4,1 kg de gás por hora, para os tratamentos 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente. Estes valores representam uma redução média do consumo de gás de 54%. Os valores médios de consumo de GLP (total) foram iguais a 9,3; 6,8; 10,7; 9,6; 12,3 e 11,9 kg, nos tratamentos 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente. Comparando-se os tratamentos 1 com 5 e 3 com 6, observa-se que os consumos médios de GLP com o gerador de calor a gás do secador comercial, foram 32,3 e 11,2% maiores em relação ao

gerador de calor a gás do secador modificado, embora o tempo de secagem tenha sido maior neste secador. Isto ocorreu devido ao fato de o fluxo de ar (m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>) ter sido 19,7% superior no secador comercial. Além disto, observa-se melhor aproveitamento do ar de secagem no secador modificado. Isto é verificado devido à menor temperatura do ar de exaustão neste secador, comprovando sua maior eficiência.

Constam nos Quadros 8 e 9 os resultados de susceptibilidade à quebra dos grãos.

Os índices de susceptibilidade à quebra encontrados em todos os testes foram inferiores a 5%. Conforme Silva *et al.* (2000), índices de susceptibilidade à quebra dessa grandeza indicam boa técnica de manuseio do secador. Nota-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).

**Quadro 10.** Percentagem dos tipos de trincas do produto obtidos após a secagem no secador modificado, nos 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
Zero	8,6	19,2	74,1	40,7	64,5	64,3	22,6	7,7	36,3	50,9	19,0	22,3
Simplex	16,8	23,1	10,2	29,7	20,9	23,2	23,5	14,0	17,6	12,1	20,4	20,2
Duplas ou múltiplas	74,6	57,7	15,7	29,7	14,5	12,5	53,9	78,3	46,1	37,0	60,6	57,5
Total com trincas	91,4	80,8	25,9	59,3	35,5	35,7	77,4	92,3	63,7	49,1	81,0	77,7

**Quadro 11.** Percentagem dos tipos de trincas do produto obtidos após a secagem no secador comercial, nos tratamentos 5 e 6

Parâmetros	Tratamento 5			Tratamento 6		
	SC 80			SC 100		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
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 com trincas	91,8	79,2	37,3	63,8	84,7	95,8

Os resultados das percentagens de trincas do produto estão relacionados nos Quadros 10 e 11. 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. E 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, verifica-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, observou-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.

A percentagem do tipo de trincas variou em relação às temperaturas do ar de secagem. Verificam-se, nos Quadros 10 e 11, que as percentagens de trincas do tipo duplas ou múltiplas foram maiores à medida que se elevou a temperatura do ar de secagem. Nota-se que o secador rotativo modificado, operando com interrupção no sistema de aquecimento de ar (tratamentos 2 e 4), proporcionou menor percentual de trincas no produto.

## CONCLUSÕES

Considerando-se os resultados obtidos e as condições em que o experimento foi realizado, pode-se concluir que:

- o consumo específico médio de energia no secador rotativo modificado (SM 80 e SM 100) foi 22,4% 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;

- as modificações técnicas realizadas no gerador de calor a gás proporcionaram uma redução média de 54% no consumo de combustível;
- os índices de susceptibilidade à quebra do milho, obtido após a secagem nos secadores rotativos, comercial e modificado foram inferiores a 5%; e
- a percentagem média de trinca total do milho no secador comercial foi 17,6% superior àquela obtida com o secador modificado.

## 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 PIF-PAF Alimentos, 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. Grains and grain quality. In: BAKKER-ARKEMA, F. W.; De BAERDEMAEKER, J.; AMIRANTE, P.; RUIZ-ALTISENT, M.; STUDMAN, C. J. **Handbook of agricultural engineering: agro processing engineering**. 1º ed., vol. IV. St. Joseph: ASAE, 1999. p. 1-10.

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. www.agricultura.gov.br. 03 abr. 2006.

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

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Balanço energético nacional – 2006. Brasília: MME 153 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.

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

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.; CECON, 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).

HALL, G.E. Test-weight changes of shelled corn during drying. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 15, n. 2, p. 320-323, 1972.

MELO, E. C.; LOPES, D. C.; CORRÊA, P. C. GRAPSI - Programa computacional para o cálculo

das propriedades psicrométricas do ar. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.12, n.2, p.154-162, Abr./Jun.,2004.

OCTAVIANI, J.C. **Avaliação de secadores horizontais rotativos com utilização de lenha e gás liquefeito de petróleo em secagem de café cereja descascado e desmucilado**. Campinas, Feagri/UNICAMP, 2005. 130p. (Tese de Doutorado).

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. (Comunicado Técnico Online, 64). [www.cnpt.embrapa.br/biblio/p\\_co64.htm](http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_co64.htm). 20 jun. 2006.

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. 106p. (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.**