

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SECADOR PARA CAFÉ DE FLUXOS CONCORRENTES E CONTRACORRENTES**

Samuel Martin<sup>1</sup>, Jadir Nogueira da Silva<sup>2</sup>, Adílio Flauzino de Lacerda Filho<sup>3</sup>, Daniel Marçal de Queiroz<sup>4</sup>, Fábio Luiz Zanatta<sup>5</sup>

**RESUMO**

Objetivou-se com este trabalho a avaliação do desempenho e eficiência energética de um secador para café de fluxos concorrentes e contracorrentes. O secador foi construído com o primeiro estágio de secagem de fluxos concorrentes, separado por uma câmara de repouso, do segundo estágio de secagem de fluxos contracorrentes. Foram aplicados dois tratamentos de secagem, caracterizados como tratamento 01 a secagem intermitente com revolvimento intermitente, à temperatura do ar de secagem de 45 °C, e tratamento 02 a secagem intermitente com revolvimento contínuo, à temperatura do ar de secagem de 70 °C. Para os testes em que foram utilizados no tratamento 01, o teor de água inicial e final observado foi respectivamente de 33,9 ± 5,0 e 11,8 ± 0,7 % (b.u.) no tratamento 02, o teor de água inicial e final foi respectivamente de 29,0 ± 3,6 e 11,6 ± 1,0 % (b.u.). Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que os níveis de temperatura da massa de grãos, em ambos os tratamentos, permaneceram dentro dos recomendados para café. A secagem intermitente com revolvimento contínuo a 70 °C apresentou menor consumo específico de energia, em relação à secagem intermitente com revolvimento intermitente a 45 °C. Maior consumo específico de energia foi observado em testes cujo término da secagem ocorreu em poucas horas após o período de repouso.

**Palavras-chave:** Pós-colheita, secador, café.

**ABSTRACT**

**ENERGY EFFICIENCY AND PERFORMANCE OF A COFFEE GRAIN DRYER USING CONCURRENT AND COUNTER-CURRENT FLOWS**

This study was done to evaluate the performance and energy efficiency of a coffee grain dryer using concurrent and counter-current air flow. The first concurrent flow drying stage was separated from the second counter-current flow stage by a repose chamber. The first drying treatment was characterized by intermittent drying with mixing with the air at 45°C, and the second by intermittent drying with continuous reflux at the air at 70°C. In the first drying system initial and final moisture contents were 33.9 ± 5.0 and 11.8 ± 0.7% (w.b.), respectively, compared to 29.0 ± 3.6 and 11.6 ± 1.0% in the second treatment. The grain temperature remained within the recommended values for coffee. Intermittent drying, with continuous mixing, at 70°C consumed less energy compared to the intermittent drying with intermittent mixing at 45°C, and there was greater specific energy consumption in tests where the drying was concluded in few hours after the repose period.

**Keywords:** Postharvest, dryer, Coffee.

**Recebido para publicação em 13/08/2008. Aprovado em 14/10/2009.**

- 1 DS em Eng. Agrícola, e-mail: samuel.martin@ufv.br
- 2 Professor DEA/UFV, Ph.D em Eng. Agrícola, e-mail: jadir@ufv.br
- 3 Professor DEA/UFV, DS em Eng. Agrícola, e-mail: alacerda@ufv.br
- 4 Professor DEA/UFV, Ph.D. em Eng. Agrícola, e-mail: queiroz@ufv.br
- 5 Doutorando DEA/UFV, MS em Eng. Agrícola, e-mail: fabio.zanatta@ufv.br

**INTRODUÇÃO**

A secagem de produtos agrícolas é definida como o processo simultâneo de transferência de calor e massa (vapor d'água) entre o produto e o ar de secagem. Neste processo a retirada de umidade é obtida pela movimentação da água, decorrente da diferença de pressão de vapor de água entre a superfície do produto a ser secado e o ar que o envolve (SILVA et al., 2008).

Este processo de remoção da água do grão é feito para manter a qualidade do produto durante a armazenagem, prevenindo o desenvolvimento de bactérias e fungos e, também, o desenvolvimento de insetos e ácaros, conforme Bala, citado por Parde et al. (2003).

O secador de grãos é um equipamento mecânico destinado à secagem por ação de ar aquecido ou natural. Com a evolução dos sistemas de secagem, encontram-se disponíveis no mercado modelos de secadores para café, como os de fluxos cruzados, concorrentes e contracorrentes, os cilíndricos rotativos e os de camada fixa (leito fixo). Entretanto, ainda novos métodos e alternativas para a secagem de café, capazes de melhorar ainda mais o processo de secagem.

Segundo Vilela (1997), em relação à secagem de café em secadores, a temperatura deve ser controlada para não ultrapassar 45 °C na massa do café, recomendável para não haja prejuízo a qualidade do café.

A análise energética é prática muito utilizada em estudos de secadores, na busca de alternativas que reduzam o consumo específico de energia.

Vários pesquisadores estudaram a secagem de café em secadores mecânicos. Osório (1982) e Lacerda Filho & Silva (2001) avaliaram a secagem de café em secadores de fluxos concorrentes. Silva (1991) avaliou a secagem intermitente em secador de fluxos contracorrentes para café. Lacerda Filho & Silva (2006) avaliaram a secagem de café em combinação, ou seja, meia-seca em leito fixo e complementação da secagem em secador de lotes, intermitente, de fluxos concorrentes. Pinto Filho (1994) avaliou um protótipo de secador de fluxos cruzados com reversão do fluxo de ar e reaproveitamento do ar de resfriamento, para a secagem de café. Pinto (1993) avaliou a utilização de dois estádios de secagem, contracorrentes e

concorrentes, em um único secador, na secagem café em coco, previamente secado até o estágio de meia-seca (umidade média de 34,7% b.u.) em terreiro ou secador de leito fixo, com complementação da secagem no secador desenvolvido. Para dois testes em que foi utilizado temperatura do ar de secagem de 120 °C, a massa de grãos foi submetida a redução de umidade de 28,4 para 13,6 % b.u. e de 37,2 para 13,0 % b.u., e o consumo específico de energia observado foi de 6.573 e 5.457 kJ kg<sup>-1</sup> de água evaporada, respectivamente.

Freire (1998) avaliou a secagem de café despulpado, pré-secado em terreiro, que passava por uma secagem parcial em um secador experimental de alta temperatura de fluxos contracorrentes e concorrentes e, em seguida, era transportado para um sistema a baixa temperatura, composto por um silo-secador. A temperatura média para o ar de secagem foi de 75,3 °C no sistema a alta temperatura e de 21,4 °C no sistema de baixa temperatura. Obteve-se menor consumo específico de energia na secagem com sistemas combinados, equivalente a 5.000 kJ kg<sup>-1</sup> de água evaporada (para redução de umidade de 32 a 13% b.u.) e 3.300 kJ kg<sup>-1</sup> de água evaporada (para redução de umidade de 42 a 14% b.u.). Para a secagem realizada a alta temperatura, o consumo específico de energia foi equivalente a 11.200 kJ kg<sup>-1</sup> de água evaporada, para redução de umidade de 24 para 14% (b.u.).

Com o intuito de oferecer novas alternativas de secagem e de atender à demanda dos cafeicultores por novas tecnologias, objetivou-se, com a realização deste estudo, avaliar o desempenho e a eficiência energética de um secador para café com estádios de secagem de fluxos concorrentes e contracorrentes.

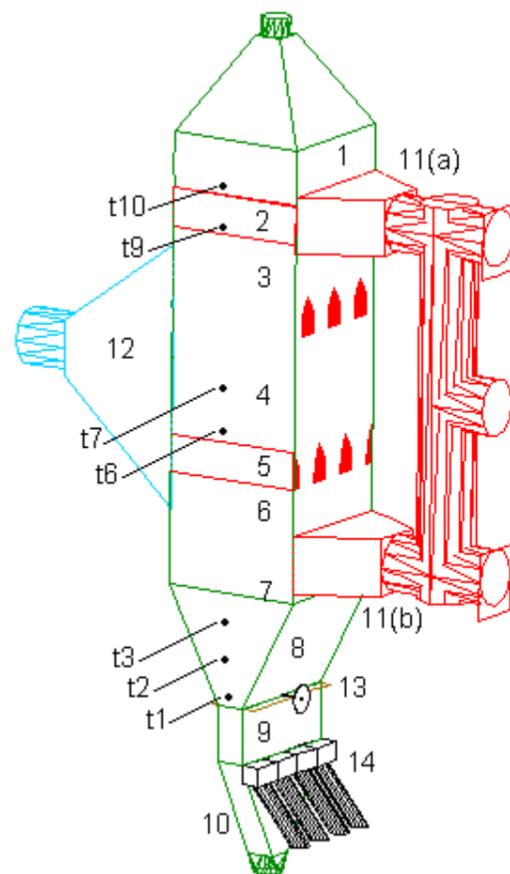
**MATERIAL E MÉTODOS**

O secador foi avaliado com a secagem de café (*Coffea arabica* L.), processado na forma cereja descascado. Os tratamentos foram assim definidos: a) Tratamento 01: 12 horas de secagem intermitente com revolvimento intermitente e 12 horas de repouso, com temperatura do ar de secagem de 45 °C. O secador foi operado por carga (seca uma carga por vez), sendo realizados revolvimentos da massa de grãos em intervalos de tempo de 90 minutos, por um período de tempo de 10 minutos cada; b) Tratamento 02: 12 horas de secagem intermitente com revolvimento contínuo

e 12 horas de repouso, com temperatura do ar de secagem de 70 °C. O secador foi operado por carga e a secagem foi realizada com mais de uma passagem dos grãos pelo secador e em cada tratamento, foram realizados quatro testes de secagem.

O secador possui dois estádios de secagem: o primeiro de fluxos concorrentes e o segundo de fluxos contracorrentes. Entre os dois estádios de secagem

existe uma câmara de repouso a fim de promover a migração de umidade no interior dos grãos. Sua capacidade estática é de 1,55 m<sup>3</sup> de grãos, com secção transversal de 0,56 m<sup>2</sup> (0,75x0,75 m). Cada câmara de secagem apresentava o volume de 0,25 m<sup>3</sup>. Todas as partes do secador foram construídas com chapas e perfis metálicos. Na Figura 1 ilustra-se o secador desenvolvido.



- 01 - Câmara de homogeneização superior
- 02 - Calhas de admissão
- 03 - Estádio de secagem de fluxos concorrentes
- 04 - Câmara de repouso
- 05 - Calhas de exaustão
- 06 - Estádio de secagem de fluxos contracorrentes
- 07 - Câmara de homogeneização inferior
- 08 - Funil de descarga superior
- 09 - Extensão do funil de descarga superior
- 10 - Funil de descarga inferior
- 11 - Plenum de admissão de ar (a) superior (b) inferior
- 12 - Plenum de exaustão de ar
- 13 - Registro de controle de descarga
- 14 - Canaleta em forma de U

t = termopares na massa de grãos

Figura 1. Croqui do protótipo do secador para secagem de café.

Dados de temperatura do ar ambiente, umidade relativa do ar ambiente e umidade relativa do ar de exaustão foram coletados no instante da coleta das amostras, fazendo-se uso de um termo-higrômetro digital, com escala de temperatura de -30 a 100°C (precisão de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ) e escala de umidade relativa de 0 a 100% (precisão de  $\pm 2\%$ ). O monitoramento da temperatura na massa de grãos dentro do secador foi realizado nos pontos onde não havia a movimentação de ar na massa de grãos. Na Figura 1 estão ilustrados os pontos onde foram dispostos os termopares tipo “t” (devidamente calibrados e conectados ao sistema de

aquisição de dados – módulos seriais) para a tomada de temperatura na massa de grãos, do ar de secagem (plenum superior e plenum inferior) e do ar de exaustão (plenum de exaustão). A determinação do teor de água foi realizada conforme as orientações contidas em Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 1992), que recomenda o método direto, em estufa com circulação forçada de ar, a  $105\pm 3^\circ\text{C}$  durante 24 horas.

A avaliação energética do sistema foi realizada conforme a metodologia descrita por Bakker-Arkema, citada por Silva et al. (1992). Esta metodologia descreve que para secadores em carga (lotes) são necessários três testes e/ou no mínimo 24 horas de

funcionamento para os secadores contínuos, sendo ao final calculado o consumo específico de energia para a secagem, com e sem energia elétrica, e o resultado expresso em kJ por kg de água evaporada.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada tratamento foi selecionado um teste para efeito de comparação, ambos com umidade inicial semelhante, e seus resultados de temperaturas e umidade relativa representados graficamente. Na Figura 2 estão representados os dados para o teste 04 (tratamento 01). Na Figura 3 estão representados os dados do teste 06 (tratamento 02). O intervalo sem dados, observado no eixo x de

ambas as figuras, corresponde ao período de repouso utilizado. Nas Figuras 2 e 3, T ambiente representa a temperatura do ar ambiente; T P Superior representa a temperatura do plenum superior; T P Inferior representa a temperatura do plenum inferior; T Exaustão representa a temperatura do ar de exaustão; UR Ambiente representa a umidade relativa do ar ambiente; UREx Antes Rev representa a umidade relativa do ar de exaustão antes do revolvimento; UREx Após Rev representa a umidade relativa do ar de exaustão após o revolvimento.

Pode-se observar que as temperaturas do ar de secagem, tanto para o tratamento 01 (45 °C) quanto para o tratamento 02 (70 °C), sofreram apenas pequenas variações ao longo dos testes de secagem. Além disso, observou-se que a condição do ar ambiente em que

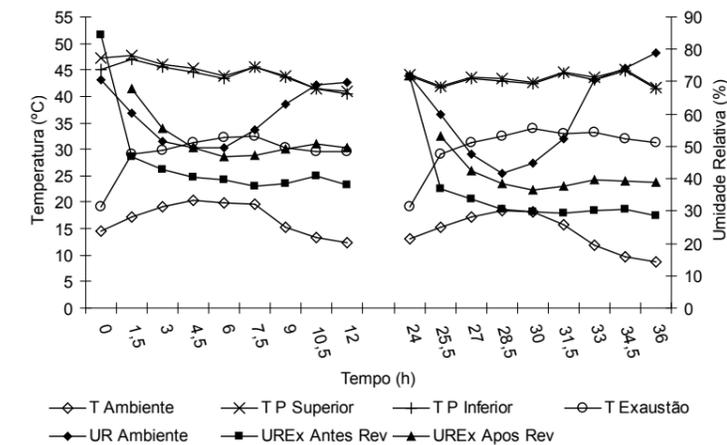


Figura 2. Variação da temperatura e da umidade relativa do ar em diferentes pontos no sistema, durante o teste 04 para o tratamento 01.

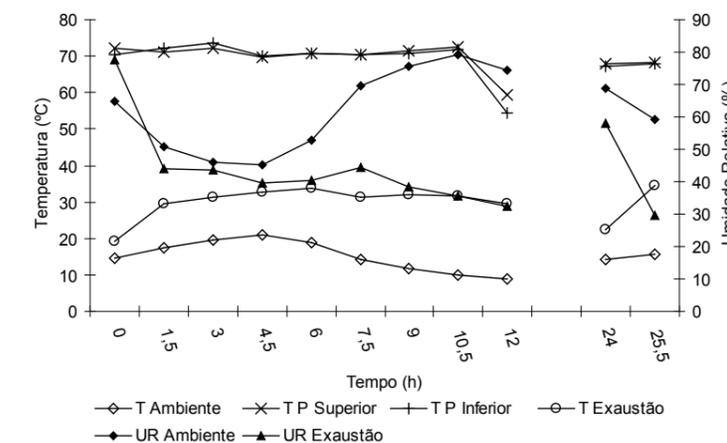


Figura 3. Variação da temperatura e da umidade relativa do ar em diferentes pontos no sistema, durante o teste 06 para o tratamento 02.

foram realizados os teste foi bastante semelhante para ambos os tratamentos, conforme ilustra as Figuras 2 e 3. O fim do processo de secagem para o tratamento 01 e 02 pode ser caracterizado quando a umidade relativa do ar de exaustão atingiu valores entre 29 e 30%.

Referente à temperatura da massa de grãos, verificou-se que os maiores resultados relativos ao tratamento 01 foram observados nos pontos 02 e 03, equivalentes a 32,2 e 31,8 °C. Relativo ao tratamento 02, a massa de grãos atingiu valores de temperatura muito próximos ao máximo permitido no final do processo de secagem. Verificaram-se maiores valores de temperatura no ponto de leitura 03, em que a temperatura atingiu o valor médio máximo de 44,9 °C.

Nas Figuras 4 e 5 são ilustradas a variação de umidade da massa de grãos de café em função do tempo de secagem, para os tratamentos 01 e 02, respectivamente.

Com base na Figura 4, observa-se os testes realizados com os maiores níveis de umidade inicial exigiram, em função do tratamento aplicado, dois períodos de repouso até que fosse completada a secagem. Em relação ao teste 09, observa-se que o término do processo de secagem foi caracterizado por um curto período de secagem, após o segundo período de repouso.

Os resultados da análise de eficiência energética do sistema de secagem proposto encontram-se relacionados nos Quadros 1 e 2, para os tratamentos 01 e 02, respectivamente.

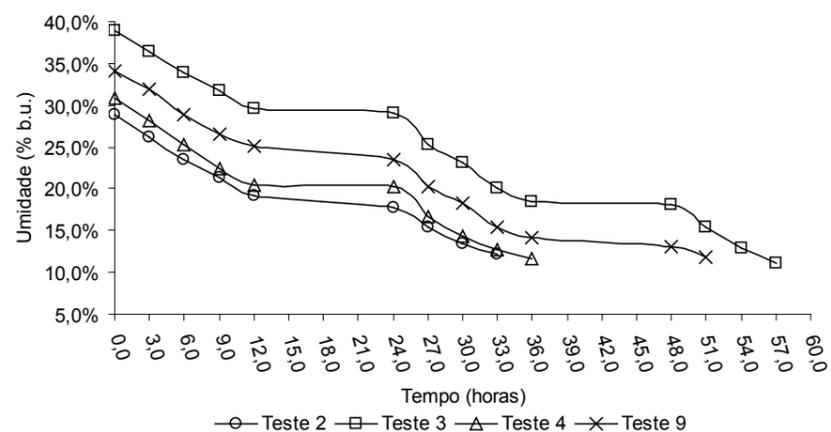


Figura 4. Curva de secagem do café, para os quatro testes realizados em que foi aplicado o tratamento 01.

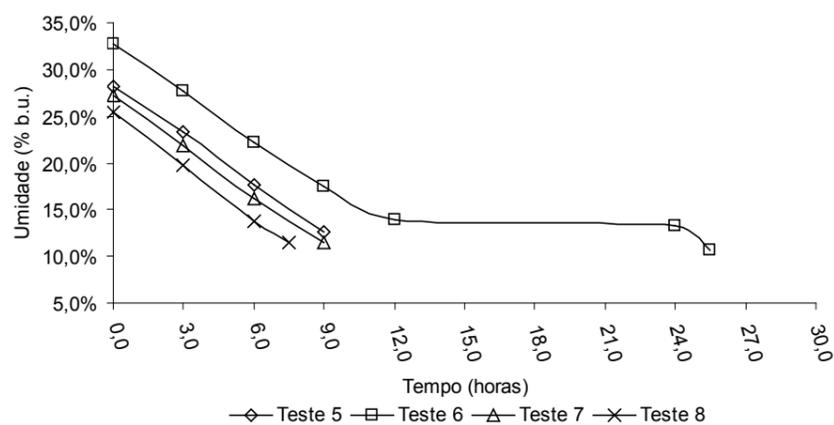


Figura 5. Curva de secagem do café, para os quatro testes realizados em que foi aplicado o tratamento 02.

Quadro 1. Resultados da eficiência energética observados no tratamento 01

Variáveis	Teste 02	Teste 03	Teste 04	Teste 09
1) Dos grãos				
Umidade inicial, % b.u.	28,88	38,95	30,83	34,01
Umidade final, % b.u.	12,47	11,11	11,57	11,79
Massa de produto úmido, kg	717	794	744	752
2) Do ar				
Temperatura do ar ambiente, °C	15,9	16,6	15,5	16,6
Temp. ar no plenum superior, °C	44,6	44,9	44,0	44,7
Temp. ar no plenum inferior, °C	44,3	44,7	43,6	43,8
3) Do secador e da energia				
Vazão específica de ar, m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup>	21,5	21,8	22,1	22,4
Vazão mássica de grãos, kg min <sup>-1</sup>	64,0	55,7	54,5	52,5
Pressão estática no plenum de exaustão (mmca)	-68,7	-69,3	-69,2	-68,6
Consumo de carvão vegetal, kg	68,0	96,9	64,3	93,6
4) Do desempenho				
Tempo total de secagem, h	33,5	56,7	36,6	51,4
Tempo efetivo de secagem, h	22,0	35,0	25,2	28,6
Consumo específico de energia, kJ kg <sup>-1</sup> de água evaporada				
a) sem energia elétrica	14.063,2	11.147,8	11.193,2	13.704,0
b) com energia elétrica	14.713,2	11.704,7	11.809,7	14.306,3

Quadro 2. Resultados da eficiência energética observados no tratamento 02

Variáveis	Teste 05	Teste 06	Teste 07	Teste 08
1) Dos grãos				
Umidade inicial, % b.u.	28,18	32,7	27,2	25,41
Umidade final, % b.u.	12,65	10,56	11,45	11,55
Massa de produto úmido, kg	671	754	696	661
2) Do ar				
Temperatura do ar ambiente, °C	16,2	15,1	18,0	21,9
Temp. ar no plenum superior, °C	71,4	69,6	70,0	70,0
Temp. ar no plenum inferior, °C	71,7	69,0	69,6	69,4
3) Do secador e da energia				
Vazão específica de ar, m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup>	21,5	21,3	21,4	21,7
Vazão mássica de grãos, kg min <sup>-1</sup>	43,9	44,7	41,2	43,2
Pressão estática no plenum de exaustão (mmca)	-68,5	-68,2	-67,6	-66,9
Consumo de carvão vegetal, kg	42,9	67,2	48,0	38,2
4) Do desempenho				
Tempo total de secagem, h	9,5	26,1	9,5	8,0
Tempo efetivo de secagem, h	9,5	14,7	9,5	8,0
Consumo específico de energia, kJ kg <sup>-1</sup> de água evaporada				
a) sem energia elétrica	9.993,1	10.158,1	10.601,4	10.234,0
b) com energia elétrica	10.544,0	10.699,7	11.134,8	10.772,6

O melhor desempenho em termos de consumo específico de energia observados no tratamento 01 mostra o que foi obtido no teste 03. Em relação ao teste 09, pode-se observar que o resultado foi o terceiro menor consumo específico de energia, dentre os quatro testes realizados, porém com expressiva diferença em relação ao teste 04 e 03. Tal resultado pode ter sido influenciado pela utilização de um segundo período de repouso com posterior curto período de operação do sistema, para a finalização da secagem. Deste modo, acabou-se provocando acréscimo no gasto de energia para o aquecimento da fornalha e da massa de grãos, para poucas horas de funcionamento, comprometendo o resultado. Tal constatação pode ser verificada comparando-se os resultados obtidos nos testes 04 e 09, por meio dos dados da curva de secagem (Figura 4) e o quadro da eficiência energética (Quadro 1). Em relação ao tratamento 02, observou-se melhor resultado no teste 05.

Ao se comparar o tratamento 01 e o tratamento 02, em relação as curvas de secagem (Figuras 4 e 5) e os resultados de eficiência energética (Quadros 1 e 2), pode-se observar que a faixa de umidade inicial recomendada para utilização do secador para os dois tratamentos foi bastante semelhante, entre 29 e 32% (b.u.). Ou seja, seriam evitados curtos períodos de secagem após as 12 horas de repouso para a complementação da secagem, otimizando o processo de carregamento e descarregamento do secador e reduzindo a perda de energia com o aquecimento da fornalha e da massa de grãos.

Outra observação importante se refere ao tempo total de secagem para os níveis de umidade inicial recomendados, para cada tratamento, em que, ao se aplicar o tratamento 01, o tempo total requerido foi de aproximadamente 24 horas de secagem mais 12 horas de período de repouso. Já em relação ao tratamento 02, com os mesmos níveis iniciais de umidade, o tempo total de secagem exigiu apenas 12 horas de secagem. Isto faz com que a opção de secagem, na qual utiliza-se o tratamento 01, mantenha o sistema ocupado por um maior período de tempo, até se processar a secagem. Já com a aplicação do tratamento 02, para os mesmos níveis de umidade inicial, pode-se ter um maior rendimento do sistema de secagem no período de safra, ou seja, a capacidade de secagem dobrada.

Ao comparar a eficiência energética obtida nos tratamentos 01 e 02, pode-se observar que, para

testes com níveis de umidade iniciais semelhantes (teste 04 relativo ao tratamento 01; teste 06 relativo ao tratamento 02), melhores resultados de eficiência energética foram obtidos no tratamento 02. Em outras palavras, o tratamento 02 proporcionou resultados energéticos mais satisfatórios do que o tratamento 01. Resultados semelhantes de eficiência energética foram observados por Freire (1998) que obteve valores de 11.200 kJ kg<sup>-1</sup> de água evaporada, para redução de umidade do café de 24 para 14% (b.u.) Entretanto, menores valores para o consumo específico de energia foram observados Pinto (1993), ao avaliar um secador intermitente de fluxos contracorrentes e concorrentes de café coco.

### CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O sistema de secagem proposto é viável para a secagem de café com os dois estádios de secagem, concorrentes e contracorrentes, funcionando concomitantemente.
- A uniformidade da temperatura do ar de secagem permitiu uma boa caracterização dos dois tratamentos avaliados.
- A temperatura da massa de grãos, em ambos os tratamentos, permaneceram dentro dos padrões recomendados para café.
- A secagem intermitente com revolvimento contínuo a 70 °C resultou em menor consumo específico de energia em comparação à secagem intermitente com revolvimento intermitente a 45 °C.
- Maior consumo específico de energia foi observado em testes cujo término da secagem ocorreu poucas horas após o período de repouso.

### AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e a CAPES, pela concessão de bolsas, e a FAPEMIG pelo financiamento do projeto.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma

Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 1992. 365 p.

FREIRE, A T. **Projeto e avaliação de um sistema para secagem combinada de café (*Coffea arabica* L.) despoldado**. Viçosa: UFV, 1998. 76 p. (Dissertação de mestrado).

LACERDA FILHO, A.F.; SILVA, J.S. Secagem de café em secador de fluxos concorrentes. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, II, 2001, Vitória. **Anais...** Vitória: ES, 2001. p. 1007-1017.

LACERDA FILHO, A.F.; SILVA, J.S. Secagem de café em combinação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 671-678, 2006.

OSÓRIO, A.G.S. **Projeto e construção de um secador intermitente de fluxo concorrente e sua avaliação na secagem de café**. Viçosa: UFV, 1982. 57 p. (Dissertação de mestrado).

PARDE, S.R.; JAYAS, D.S.; WHITE, N. D. G. Grain drying: a review. **Science des Aliments**, v. 23, n. 5/6, p. 589-622, 2003.

PINTO, F.A.C. **Projeto de um secador de fluxos**

contracorrente/concorrente e análise de seu desempenho na secagem de café (*Coffea arabica*, L.). Viçosa: UFV, 1993. 57 p. (Dissertação de mestrado).

PINTO FILHO, G. L. **Desenvolvimento de um secador de fluxos cruzados com reversão do fluxo de ar e reaproveitamento do ar de resfriamento para a secagem de café (*Coffea arabica* L.)** Viçosa: UFV, 1994. 80 p. (Dissertação de mestrado).

SILVA, J.S.; AFONSO, A.D.L.; DONZELLES, S.M.L.; NOGUEIRA, R.M. Secagem e secadores. In: SILVA, J.S. (ed.) **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. p. 109-146.

SILVA, J.S.; PINTO, F.A.C.; AFONSO, A.D.L. Desempenho de secadores e custo de secagem. **Engenharia na Agricultura**, v. 2, n. 4, 1992. 18 p. (Caderno didático).

SILVA, L.C. **Desenvolvimento e avaliação de um secador de café (*Coffea arabica* L.) intermitente de fluxos contracorrente**. Viçosa: UFV, 1991. 74 p. (Dissertação de mestrado).

VILELA, E.R. Secagem e qualidade do café. **Informe Agropecuário**, v. 18, n. 187, p. 55-63, 1997.