

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE MILHO EM SECADOR INTERMITENTE DE FLUXOS CRUZADOS

Domingos Sárvio Magalhães Valente¹, Daniel Marçal de Queiroz², Luís César da Silva³,
Fábio Lúcio Santos⁴, Iara Arrighi Diogo⁵

Resumo: A secagem de grãos é conduzida para adequar o teor de água a níveis propícios para conservação, processamento e comercialização. Para reduzir o tempo de secagem e garantir altos fluxos horários de processamento são empregados sistemas de secagem de alto custo de aquisição e que consomem altas quantidades de energia calorífica. Para avaliar e otimizar esses sistemas tem sido empregada a técnica de modelagem e simulação. No entanto, o emprego dessa técnica tem requerido dos usuários conhecimento de linguagens de programação e, ou de simulação, o que são fatores limitantes. Desse modo, para demonstrar a facilidade de uso e a precisão do aplicativo computacional LINSEC, foi modelado e simulado a secagem de milho em um secador intermitente de fluxos cruzados com reversão do fluxo do ar de secagem. Resultados, simulados e experimentais obtidos em literatura, foram contrastados. De acordo com as análises estatísticas constatou-se que os desvios absolutos máximo e médio, entre os valores simulados e experimentais para teor de água foram 2,16 e 1,15% b.u, respectivamente; e os erros absolutos máximo e médio foram de 2,30 e 1,21%, respectivamente. Com os resultados obtidos pode-se concluir que o LINSEC apresentou precisão satisfatória.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem; Secagem de grãos; Modelo de Thompson.

¹ Professor Adjunto da Universidade Federal de Viçosa – UFV, Dep. de Engenharia Agrícola, Campus da UFV, CEP: 36570-000, valente@ufv.br

² Professor Associado da Universidade Federal de Viçosa – UFV, Dep. de Engenharia Agrícola, Campus da UFV, Viçosa, MG, queiroz@ufv.br

³ Professor Associado da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Dep. de Engenharia Rural, Campus de Alegre, 29500-000, Alegre-ES, Brasil, silvalc@cca.ufes.br.

⁴ Professor Adjunto da Universidade Federal de Viçosa – UFV, Dep. de Engenharia Agrícola, Campus da UFV, Viçosa-MG, fabio.ls@ufv.br

⁵ Estudante de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa-MG, iaraarrighid@yahoo.com.br

MODELING AND SIMULATION OF CORN DRYING IN AN INTERMITTENT CROSS FLOW DRIER

Abstract: Grain drying is carried out to fit the moisture content at ideal levels for storage, processing and marketing. To reduce drying time and to guarantee high hourly processing flow, it is employed drying systems of high acquisition cost that consumes high quantities of calorific energy. For evaluation and optimization of drying systems have been used modeling and simulation techniques. However, to employ this technique it has been required user knowledge in programming or simulation languages, what has been a limitation factor. Thus to demonstrate the ease of use and precision of LINSEC, a computational applicative, it was modeled and simulated drying corn on an intermittent cross flow dryer with reversion of drying air flow. Simulated and experimental data obtained from literature were contrasted. According to statistical analysis the maximum and mean absolute deviation between simulated and experimental moisture content were 2.16 and 1.15% wb, respectively; and the maximum and average absolute errors were 2.30 and 1.21%, respectively. Thus, according to obtained results can be concluded that LINSEC showed satisfactory precision.

KEY-WORDS: Modeling; Grain drier; Thompson model.

INTRODUÇÃO

A secagem de produtos agrícolas visa à remoção do excesso de água do produto a níveis de teor de água que permitam a armazenagem segura e atentam os requisitos para comercialização e processamento (JAYAS et al., 2003; LIU et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2010). Para atingir esses objetivos em escala comercial são utilizados sistemas de secagem de alta capacidade horária, que empregam altas temperaturas do ar de secagem (LUANGMALAWAT et al., 2007). Esses

sistemas, geralmente, implicam na utilização de secadores de alto custo de aquisição e elevado consumo de energia para aquecimento do ar de secagem (REINATO et al., 2002; SHARMA et al., 2009).

A diminuição do teor de água dos grãos implica na redução da atividade de água no ambiente de armazenagem, o que inviabiliza o desenvolvimento de fungos e bactérias, conseqüentemente, é estendido o tempo de armazenagem (ERENTURK et al., 2004; ULLMANN et al., 2010). A

redução do teor de água em um secador inadequadamente projetado e operado provoca danos a grãos de milho, como, descoloração, quebras, trincas (BUNYAWANICHAKUL et al., 2007; LUANGMALAWAT et al., 2007; NISHIYAMA et al., 2005; RAO et al., 2006), o que além de depreciar a qualidade do produto facilita a proliferação de insetos e fungos.

Para projetar, avaliar e definir os procedimentos de operação dos secadores, modelos matemáticos para simulação de secagem têm sido empregados para previsão de parâmetros como: tempo de secagem, consumo de energia calorífica, teor de água final do produto, quantidade de água removida durante a secagem e consumo específico de energia (DALPASQUALE et al., 2008).

Valente et al. (2012) desenvolveram o programa computacional LINSEC para modelagem e simulação de secagem de grãos. O LINSEC apresenta uma biblioteca de blocos, que permite modelar e simular diferentes configurações de sistemas de secagem de grãos. Os blocos do LINSEC aplicam-se a modelagem de aspectos relacionados ao ar, produto e secador. Desse modo cada bloco modela e simula os diferentes elementos de um sistema de secagem. Para elaborar o modelo, o usuário deve selecionar os blocos, conectá-

los segundo a lógica operacional do sistema de secagem no que se refere aos fluxos de movimentação de ar e de produto, e introduzir os dados relativos à operação.

Uma vez estruturado o modelo no ambiente LINSEC, o usuário pode dar o comando para o início da simulação, quando então, primeiro o aplicativo interpreta a lógica do sistema proposto pelo usuário, e em seguida gera um código de instruções para a simulação da secagem de grãos segundo a metodologia proposta por Thompson (THOMPSON et al., 1968). Essa metodologia representa uma das melhores opções para simulação de secagem de grãos em altas temperaturas, devido à sua baixa exigência de recursos computacionais e precisão na estimativa de variáveis de saída. A metodologia baseia-se em leis de transferência de calor e massa e uma equação empírica que decreve a curva secagem de uma camada delgada de grãos (DALPASQUALE et al., 2008; DALPASQUALE; SPERANDIO, 2010; SOUZA et al., 2002).

Mediante a fundamentação acima apresentada, foi definido como objetivo desse trabalho empregar o programa computacional LINSEC na modelagem e a simulação da secagem de milho em um secador intermitente de fluxos cruzados com reversão do fluxo do ar de secagem.

intermitente e com reversão do fluxo do ar de secagem.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido utilizando o programa computacional LINSEC (VALENTE et al., 2012) para modelar o secador de fluxos cruzados construído e avaliado por Sabioni (1986), ao secar de milho em regime de operação

O secador modelado, Figura 1, tem seção circular com diâmetro de 1,60 m e altura de 4,24 m. Internamente, na vertical em sentido descendente o secador é dividido em três seções: câmara de descanso e a primeira e segunda câmaras de secagem.

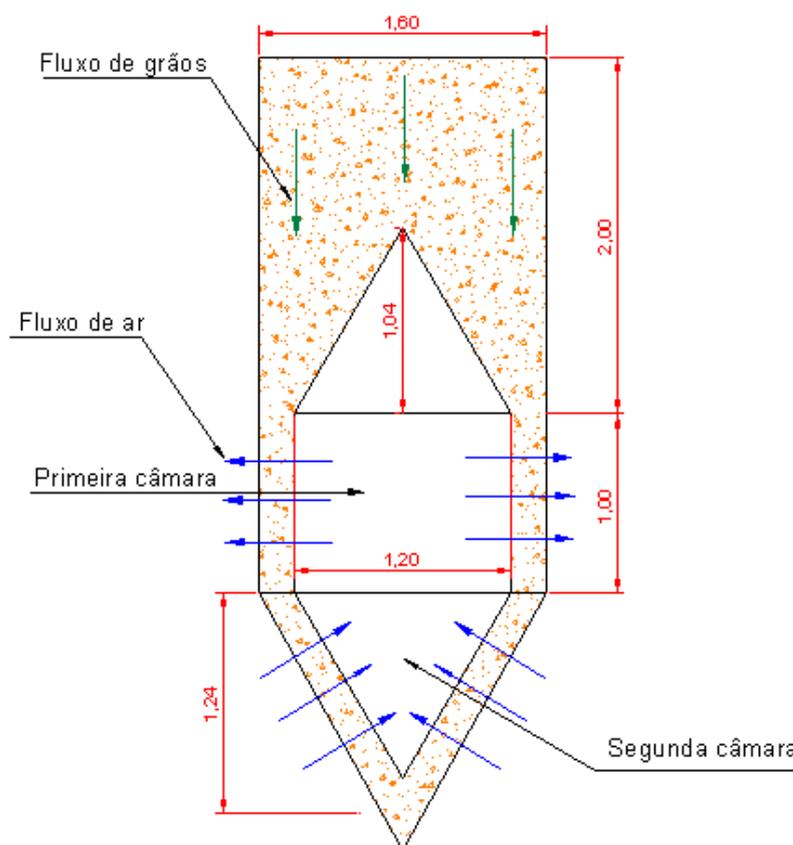


Figura 1 – Representação esquemática do secador intermitente de fluxos cruzado, proposto e avaliado por Sabioni (1986)

A câmara de descanso, com altura de 2,0 m, possui formato cilíndrico na parte superior. A descarga dessa câmara é feita pelas laterais por meio de uma seção inferior cônica, permitindo que o produto

flua pela lateral da primeira câmara de secagem formando uma camada com espessura de 0,20 m.

A primeira câmara de secagem tem formato cilíndrico com diâmetro externo

de 1,60 e interno de 1,20. Desse modo, a espessura da camada de grãos é de 0,20 m. Quanto à segunda câmara de secagem, esta apresenta formato cônico com diâmetro de 1,20 m e profundidade de 1,24 m. Nessa câmara a espessura da camada de grãos é 0,20 m.

O fluxo do ar de secagem, proveniente da fornalha, é introduzido pelo lado externo da segunda câmara de secagem, cruzando a camada de grãos e seguindo para o interior da primeira câmara de secagem. Dessa câmara o ar cruza novamente a camada de grão seguindo da parte interna para a externa. Desse modo, é feita a reversão e o reaproveitamento do ar de secagem.

Modelagem e Simulação

Conforme representado na Figura 1, a primeira câmara de secagem foi modelada no LINSEC com diâmetro interno de 1,20 m, diâmetro externo de 1,60 m e altura de 1,00 m. Para

modelagem da segunda câmara foi necessário converter o formato cônico, em um cilindro reto. Para isso, foi determinada uma altura equivalente do cilindro reto com base na área média da segunda câmara de secagem, mantendo as dimensões do diâmetro interno e externo da câmara de secagem superior. Dessa forma, a segunda câmara de secagem foi modelada com diâmetro interno de 1,20 m, diâmetro externo de 1,60 m e altura equivalente de 0,70 m, o que corresponde a área média da câmara igual a 3,08 m².

Na Figura 2 é apresentado o modelo implementado no ambiente do LINSEC, tendo sido utilizado nove blocos. Conforme a lógica operacional do secador modelado, a segunda câmara de secagem recebe o fluxo do ar de secagem do sistema de aquecimento, e o repassa a primeira câmara de secagem, o que caracteriza a reversão e o reaproveitamento do ar de secagem.

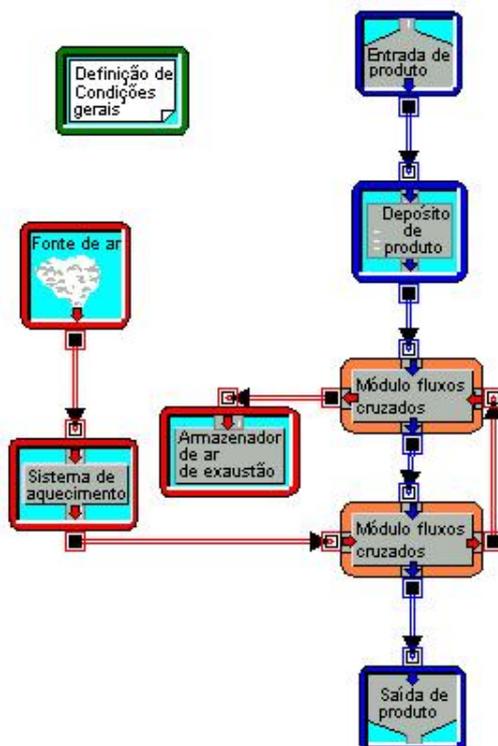


Figura 2 – Modelo do secador de intermitente de fluxos cruzados, no ambiente do programa LINSEC

Para simulação foram empregados dados coletados por Sabioni (1986), Tabela 1, relativos a nove testes experimentais realizados. E para averiguação da precisão

do programa LINSEC foram utilizados os valores de teor de água final de cada um dos testes conduzidos.

Tabela 1 – Condições de secagem nos testes experimentais realizados por Sabioni (1986) e implementados no LINSEC para realização das simulações em secador intermitente de fluxos cruzados para milho

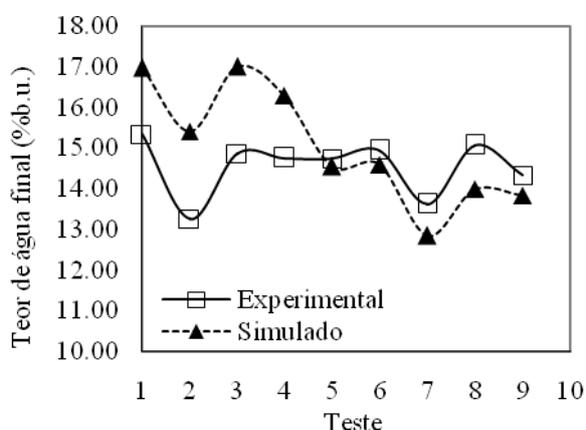
Condições de secagem	Testes experimentais								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Teor de água inicial (%b.u.)	24,51	23,05	24,19	25,11	21,97	21,83	26,98	22,07	26,89
Temperatura do produto (°C)	26,10	27,70	21,90	22,10	25,00	26,30	25,50	23,10	25,70
Temperatura do ar de secagem (°C)	61,00	61,50	61,10	81,50	80,90	81,30	101,60	100,30	101,70
Temperatura ambiental (°C)	27,80	26,10	27,10	28,00	27,60	26,10	23,30	27,90	27,70
Umidade relativa ambiente (%)	54	58	53	64	51	62	72	50	56
Tempo de secagem (h)	8,00	7,50	8,50	7,00	4,00	4,00	7,00	3,50	5,50
Volume de produto no depósito (m ³)	1,67	1,26	1,97	2,56	1,42	1,46	2,33	1,94	1,63
Fluxo de produto (t.h ⁻¹)	1,48	1,45	1,65	1,92	1,25	1,34	1,52	1,34	1,77
Vazão de ar (m ³ .min ⁻¹)	79,7	78,5	79,7	85,9	88,3	87,1	86,8	88,6	86,2

RESULTADOS E DISCUSSÃO

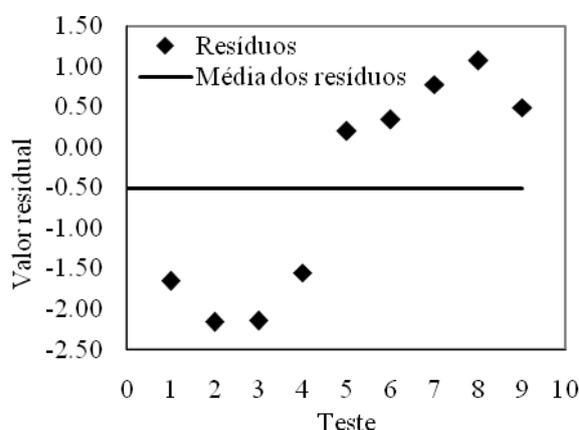
Na Figura 3 (a) é apresentada a comparação entre o entre os teores de água final simulados e os obtidos experimentalmente por Sabioni (1986). Para os testes 1, 2, 3 e 4 os teores de água final simulados foram maiores que os obtidos experimentalmente, e o inverso ocorreu para os demais testes. Os desvios absolutos, máximo, mínimo e médio, para os teores de água experimental e simulado nos nove testes foram de 2,16; 0,20 e 1,15% b.u, respectivamente. O maior erro

absoluto médio ocorreu para temperaturas de secagem de 60°C, com valor de 1,98% b.u.. A temperatura de 80 °C apresentou menor erro absoluto médio, com valor de 0,70% b.u..

Na Figura 3(b) é apresentado o gráfico da distribuição dos valores residuais para os nove testes realizados. Observa-se pela análise da Figura 3(b), que os valores residuais não apresentam padrão aleatório, caracterizando comportamento tendencioso dos valores simulados.



(a)



(b)

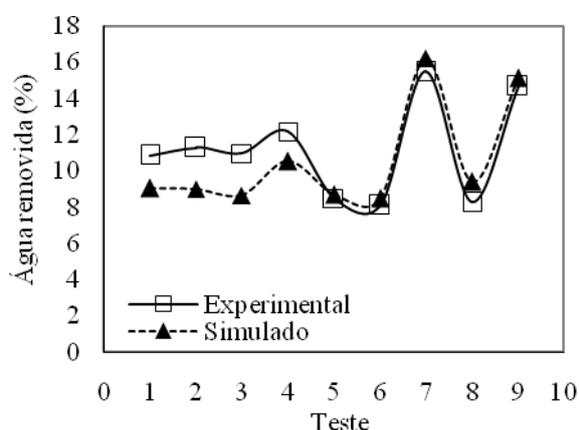
Figura 3 – (a) Comparação entre os teores de água final simulados e obtidos experimentalmente por Sabioni (1986) e (b) Tendência da distribuição dos valores residuais para os nove testes

Na Figura 4 (a) é apresentada a comparação entre o percentual de água removida nos testes de simulação e experimentais conduzidos por Sabioni

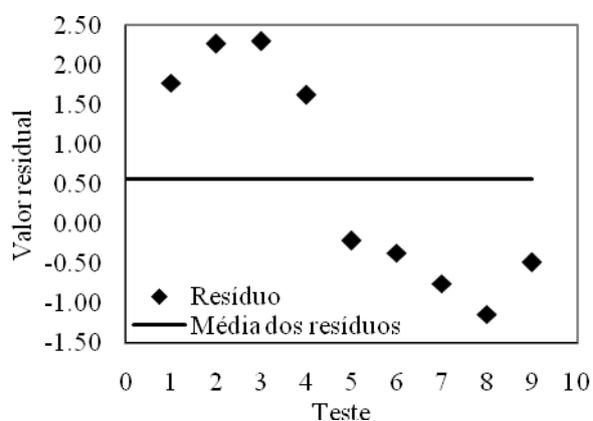
(1986). Observa-se que as maiores diferenças entre o percentual de água removida experimentalmente e simulados foram para os testes 1, 2, 3 e 4. Os desvios

absolutos, máximo, mínimo e médio, das diferenças percentuais de água removida foram de 2,30, 0,21 e 1,21%, respectivamente. O maior erro absoluto médio ocorreu para temperaturas de secagem de 60°C com valor de 2,11%. A temperatura de 80°C apresentou menor erro absoluto médio, com valor de 0,74%.

Na Figura 4(b) é apresentado o gráfico da distribuição dos valores residuais para o percentual de água removida nos nove testes realizados. Observa-se que, pela análise da figura que os valores simulados apresentam tendências devido ao padrão não aleatório do gráfico.



(a)



(b)

Figura 4 – (a) Comparação entre o percentual de água removida dos grãos na simulação e o percentual de água removida dos grãos nos testes experimentais conduzidos por Sabioni (1986) e (b) Tendência da distribuição dos valores residuais para os nove testes realizados

Conforme apresentado, para temperaturas de secagem de 60°C constatou-se uma tendência dos resultados simulados subestimarem os valores reais, ou seja, a quantidade de água removida para os testes simulados foram menores que os experimentais. O resultado inverso ocorreu para temperaturas de secagem de 100°C. Os melhores resultados foram determinados para a temperatura de

secagem de 80°C. Os resultados encontrados foram considerados satisfatórios, uma vez que o modelo de Thompson baseia-se nas leis de transferência de calor e massa e uma equação empírica de secagem em camada delgada de grãos (DALPASQUALE et al., 2008; DALPASQUALE; SPERANDIO, 2010; SOUZA et al., 2002). Diferentemente de modelos de simulação

teóricos, conforme apresentado por Dalpasquale et al. (2009) e Dalpasquale, et al. (2012), que implementaram e simularam utilizando-se o modelo teórico de Michigan State University – MSU, os resultados mostram-se mais precisos e mais sensíveis à diferentes condições de entrada, no entanto, com maior demanda computacional.

CONCLUSÕES

Os resultados simulados por meio do LINSEC apresentaram estatisticamente confiáveis, portanto o aplicativo computacional pode ser utilizado na análise e avaliação de sistemas de secagem que empregam secadores de fluxos cruzado, sendo que os valores simulados apresentaram maiores precisões para as temperaturas do ar de secagem na faixa de 80 °C.

A estruturação de modelos de simulação de secagem por meio do programa computacional LINSEC não requer do usuário conhecimento de linguagem de programação. Isso potencializa o uso da modelagem e simulação no desenvolvimento de projetos e avaliações de sistemas de secagem.

REFERÊNCIAS

Revista Agrotecnologia, Anápolis, v. 4, n. 1, p. 109 - 119, 2013

BUNYAWANICHAKUL, P.; WALKER, G. J.; SARGISON, J. E.; DOE, P. E. Modeling and Simulation of Paddy Grain (Rice) Drying in a Simple Pneumatic Dryer. **Biosystems Engineering**, v. 96, n. 03, p. 335-344, 2007.

DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D.; SILVA, L. H. M.; KOLLINGA, E. Fixed-bed drying simulation of agricultural products using a new backward finite difference scheme. **Applied Mathematics and Computation**, v.200, n.2, p.590-595, 2008.

DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D. Modelo de simulação de secagem de produtos agrícolas usando entalpia do ar constante. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 04, p. 726-731, 2010.

DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D.; MONKEN E SILVA, L. H. Fixed-bed drying simulation with constant enthalpy, using the improved Michigan State University model. **Acta Scientiarum. Technology**, v.34, n.2, p.137-140, 2012.

DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D.; MONKEN E SILVA, L. H. Performance of the Michigan drying simulation model with a new drying rate

concept. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.31, n.4, p.553-557, 2009.

ERENTURK, K.; ERENTURK, S.; TABIL, L. G. A comparative study for the estimation of dynamical drying behavior of *Echinacea angustifolia*: regression analysis and neural network. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 45, n. 01/03, p. 71-90, 2004.

JAYAS, D. S; WHITE, N. D. G. Storage and drying of grain in Canada: low cost approaches. **Food Control**, v. 14, n. 04, p. 255-261, 2003.

LIU, X; CHEN, X.; WU, W.; PENG, G. A neural network for predicting moisture content of grain drying process using genetic algorithm. **Food Control**, v. 18, n. 08, p. 928-933, 2007.

LUANGMALAWAT, P.; PRACHAYAWARAKORN, S.; NATHAKARANAKULE, A.; SOPONRONNARIT, S. Effect of temperature on drying characteristics and quality of cooked rice. **LWT - Food Science and Technology**, v. 41, n. 04, p. 716-723, 2007.

NISHIYAMA, Y.; CAO, W.; LI, B. Grain intermittent drying characteristics analyzed

by a simplified model. **Journal of Food Engineering**, v. 76, n. 03, p. 272-279, 2005.

OLIVEIRA, G. H. H.; CORRÊA, P. C.; ARAÚJO, E. F.; VALENTE, D. S. M.; BOTELHO, F. M. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays*L.). **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, n. 03, p. 546-554, 2010.

RAO, P. S.; BAL, S.; GOSWAMI, T. K. Modelling and optimization of drying variables in thin layer drying of parboiled paddy. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 02, p. 480-487, 2006.

REINATO, C. H. R.; BORÉM, F. M.; VILELA, E. R.; CARVALHO, F. M.; MEIRELES,

E. 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**, v. 06, n. 01, 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.). 1986.

Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa. 106p.

SHARMA, A.; CHEN, C. R.; LAN, N. V. Solar-energy drying systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.13, n.6-7, p.1185-1210, 2009.

SOUZA, C. M. A.; QUEIROZ, D. M.; LACERDA FILHO, A. F. Simulação do Processo de Secagem de Sementes de Milho em Camada Fixa. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 04, p. 653-660, 2002.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying: a new model. **Transaction of the ASAE**, v. 11, n. 04, p. 582-586, 1968.

ULLMANN, R.; RESENDE, O.; SALES, J. F.; CHAVES, T. H. Seed quality of jatropha under different drying air conditions. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 03, p. 442-447, 2010.

VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; SILVA, L. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; SANTOS, F. L. LINSEC - The software for modeling and simulation of grain drying systems. **Revista Ciência Agronômica**, v.43, n.4 , p.664-673 , 2012.