

PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DE SECAGEM DE GRÃOS

Mario Eduardo R. M. Cavalcanti Mata¹, Luís A. Dantas², Maria Elita Duarte Braga¹

RESUMO

Foi desenvolvido um programa computacional em linguagem Clipper/dbase IV para simulação de secagem de produtos agrícolas (arroz, café, feijão, milho, soja e trigo). O programa é constituído com alternativas para determinação das propriedades psicrométricas do ar ambiente a partir de Temperatura de bulbo seco (Tbs) e Temperatura de bulbo molhado (Tbu) ou Temperatura de bulbo seco (Tbs) e Umidade relativa do ar (UR) e para as condições de aquecimento do ar em intervalos de 1 a 150 °C. O programa permite a simulação de secagem em secadores de camada estacionária utilizando o modelo de Thompson. Para o caso do milho, existe a possibilidade de simular também pelo modelo de Hukill. O programa permite, ainda, simular a secagem de milho em secadores de fluxo cruzado e fluxo concorrente. Este programa é bastante versátil, permitindo a inclusão de outros grãos, necessitando, para tanto, do conhecimento específico das equações do produto. Neste trabalho, foram testadas as simulações de secagem de arroz, café, feijão, milho, milho branco, soja e trigo e concluiu-se que para esses seis produtos, com temperaturas variando no intervalo de 25 a 80°C, os modelos de simulação adequam-se aos valores experimentalmente obtidos por diversos autores.

Palavras-chave: programa computacional, secagem, grãos.

COMPUTER PROGRAM FOR GRAIN DRYING SIMULATION

ABSTRACT

A computer program was developed in Clipper/dbase IV language to simulate the drying of agricultural products (rice, coffee, beans, maize, soybean and wheat). The program was written containing alternatives to determine the psychometric properties of ambient air as function of the dry bulb temperature (Tdb) and wet bulb temperature (Twb), or dry bulb temperature (Tdb) and relative humidity (RH) of the air and also for the conditions of air heating from 1 to 150 °C. The program allows the simulation of drying in fixed-bed dryers using the Thompson model. For the case of maize it also permits the simulation by the Hukill model. The program is further able to simulate the drying of maize in cross flow and concurrent flow dryers. It is a very versatile program, which allows for the introduction of other grains, although requiring specific knowledge of the product equations. In this paper, the simulations for the drying of rice, coffee, beans, maize, white maize,

Trabalho Revisado pelo Professor José Helvécio Martins da Universidade Federal de Viçosa, Ph.D. pela Universidade de Purdue.

¹ Professores Doutores do Departamento de Engenharia Agrícolas da UFPB, Av Aprigio Veloso No. 882, CEP 58.109-970, Campina Grande –PB Fone (083) 310-1287, e-mail mmata@deag.ufpb.br

² Técnico de Nível Superior do Núcleo de Tecnologia em Armazenagem da UFPB.

soybean and wheat were tested, leading to the conclusion that the simulation models are adequate to simulate the values obtained experimentally by various authors for these six products, for drying air temperature varying from 25 to 80 °C.

Keywords: software, drying, grains.

INTRODUÇÃO

No sistema produtivo agrícola, ainda, tem-se dado grande ênfase às pesquisas sobre secagem de grãos, pois este processo representa em torno de 12% da energia total gasta nos sistemas de beneficiamento pós-colheita.

A secagem, além de representar um custo equivalente a este percentual, é um processo de fundamental importância, pois prepara o produto para a armazenagem e exerce uma forte influência na manutenção da sua qualidade durante o período de conservação, porque o baixo teor de umidade diminui a atividade físico química do produto e inibe as atividades microbianas associadas.

A secagem é um processo que precisa ser previsto, dimensionado e planejado. Neste contexto, deve ser útil para qualquer engenheiro projetista, pesquisador ou administrador, a utilização de um programa que permita simular este processo de secagem de modo a prever sob as condições próprias de uma região, o melhor tipo de secador e as condições específicas de secagem, além do tempo necessário para realizá-la.

Na década de 70, era comum utilizar um computador IBM de grande porte para resolver problemas complicados que exigissem operações matemáticas complexas ou grande volumes de operações simples, embora a utilização desses computadores, praticamente, estava restrita às Universidades e ou aos Institutos de Pesquisa.

Com a evolução da informática na década de 80 e a migração de grande parte da tecnologia dos grandes computadores para os computadores pessoais, é possível, atualmente, executar um grande volume de operações nestes computadores e até mesmo em computadores portáteis, como nos "notebooks" e nos "Laptops".

Desta forma, só no final da década de 80 e início da de 90, foi possível desenvolver programas computacionais que pudessem estar ao alcance de qualquer engenheiro projetista ou estudante universitário. Assim, a partir deste período, a simulação de processos, mediante programas específicos, foi tomando cada vez mais vulto, de modo a constituir-se

atualmente, em uma das maiores fontes econômicas de um país.

Os programas de simulação visam a economizar tempo e dinheiro de modo a prever a realidade, sendo preciso, para isto, conhecer bem o processo físico e o modelo matemático que o representa.

Normalmente, os programas desenvolvidos para simular a secagem de grãos têm utilizado parâmetros genéricos. No entanto, é necessário levar em consideração que equações impróprias só podem estimar grosseiramente o que acontece com um produto. Nascimento et al. (1991) verificaram este fato ao comparar a simulação de secagem do milho feita com o modelo de Thompson, utilizando as equações descritas por Queiroz et al. (1982), para o milho irrigado, variedade maia anão. Os pesquisadores concluíram que os parâmetros utilizados apresentam diferenças significativas entre os dados experimentais e os simulados.

É necessário, também, mencionar que muitos trabalhos de pesquisa ainda deverão ser necessários para que exista, no Brasil, um banco de dados confiável que possa conter as diferentes equações dos diferentes produtos nacionais, principalmente, porque existe no país uma das maiores diversidades de produtos do mundo, sem considerar que novas variedades sempre estão em desenvolvimento de modo a atender às expectativas nutricionais do ser humano e animal.

Portanto, diante desses fatos, o programa computacional tem aplicações limitadas e foi desenvolvido para possibilitar a determinação das propriedades psicrométricas do ar ambiente e do ar aquecido para temperaturas no intervalo de 1 a 150°C e realizar a simulação de secagem dos produtos arroz, café, feijão, milho, milho branco, soja e trigo em secadores de camada estacionária, utilizando o modelo de Thompson. Além disso, o programa permite ainda simular a secagem de milho em secadores de fluxo cruzado e fluxo concorrente além da simulação em camada estacionária pelo modelo de Hukill. O programa tem uma concepção bastante versátil, permitindo a inclusão de outros grãos, necessitando, para tanto, do conhecimento do modelo de secagem específico para cada produto.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Núcleo de Tecnologia em Armazenagem da Universidade Federal da Paraíba, utilizando-se um micro-computador 486 DX4 de 120 MHz.

O presente programa foi desenvolvido em linguagem Clipper/dBase IV, tendo como base as equações citadas na literatura para os diferentes produtos estudados: arroz, café, feijão, milho, milho branco, soja e trigo (Thompson et al., 1968; Rossi & ROA, 1980; Queiroz et al., 1982; ASAE Standars, 1984; Cavalcanti Mata, 1992; Braga, 1991; Brokker et al., 1992; Moraes Neto et al., 1993; Cavalcanti Mata, 1993).

O programa é constituído de uma tela de abertura para escolha do produto a ser simulado (Figura 1). A tela seguinte, (Figura 2), permite, caso necessário, a determinação das propriedades psicrométricas do ar ambiente e ar aquecido até 150 °C. Para tanto, pode-se utilizar a temperatura de bulbo seco (Tbs) e a temperatura de bulbo molhado (Tbm) ou temperatura de bulbo seco (Tbs) e umidade relativa (UR) do ar. Com os dados de entrada, podem ser calculadas as propriedades psicrométricas do ar alterando-se a pressão atmosférica, que já vem pré-determinada como 760 mm Hg. As equações utilizadas para esses cálculos foram descritas por Wilhelm (1976) e Queiroz et al. (1982).

A utilização da tela 2 pode ser dispensada para uso na simulação de secagem em secadores de camada fixa, fluxo cruzado e fluxo concorrente, pois os cálculos das propriedades psicrométricas necessárias à secagem, nestes casos, é feito nas próprias sub-rotinas.

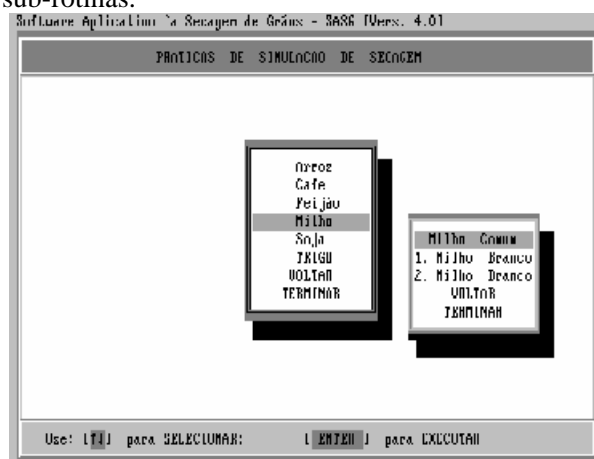


Figura 1 - Tela de abertura para escolha do produto a ser simulado

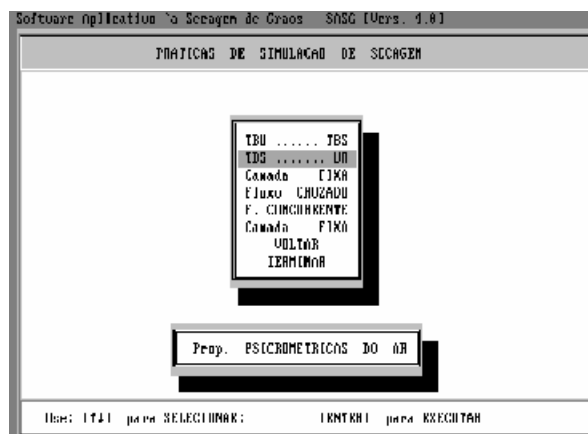


Figura 2 - Tela que permite selecionar as determinações das propriedades psicrométricas do ar ou os tipos de simulação de secagem

A tela 3 (Figura 3) permite escolher o número de camadas de 3 a 10 a serem simuladas, sendo que de 3 a 5 os dados simulados permitem ser observados no monitor e de 6 a 10 só via impressora.

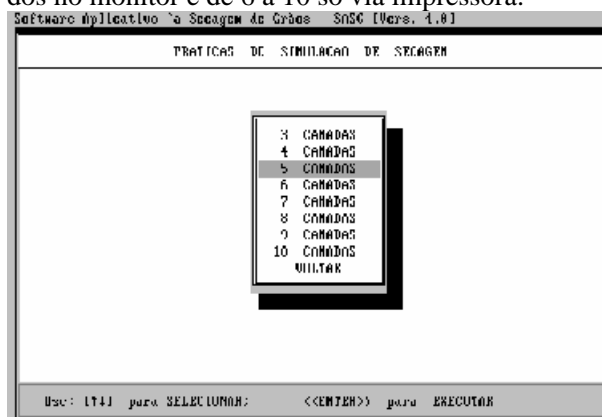


Figura 3 - Tela que permite escolher o número de camadas para simulação

Simulação de secagem de grãos em camada estacionária

Modelo de Thompson

Thompson et al. (1968) propôs um modelo que simula a influência das condições do ar de secagem, dos fluxos de ar e de grãos, da espessura da camada e do teor de umidade inicial do produto no processo de secagem, considerando-o como vários pequenos processos. Segundo Queiroz et al. (1982), os autores utilizaram o procedimento de dividir o processo contínuo de secagem em vários pequenos

processos, simulando-os mediante cálculos consecutivos das trocas que ocorrem durante pequenos incrementos de tempo. A Figura 4 mostra, esquematicamente, um desses processos. Durante um intervalo de tempo Δt uma quantidade de umidade ΔU é evaporada e transportada pelo ar, que aumenta sua ra-

zão de umidade W para $W + \Delta W$. Durante a secagem, a temperatura do ar diminui de um valor ΔT proporcional ao aumento de temperatura do grão, $\Delta\Phi$, e ao resfriamento evaporativo, que acompanha a remoção de umidade.

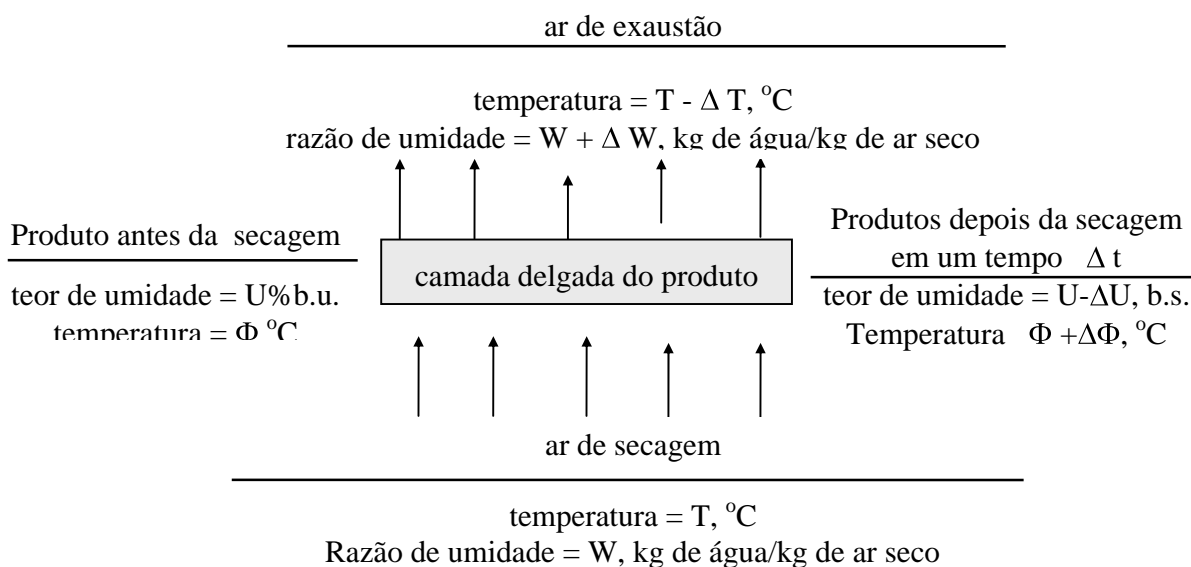


Figura 4 - Representação esquemática da secagem em camada delgada

No modelo de THOMPSON et al. (1968) foram feitas as seguintes suposições:

1 - A secagem de uma camada delgada é representada pela equação:

$$t = A \cdot \ln(RU) + B \cdot [\ln(RU)]^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

em que

t = tempo, h;

A, B = constantes que dependem do produto e da temperatura

RU = razão de umidade, adimensional;

A razão de umidade é definida por:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que

U = teor de umidade, base seca, decimal;

U_e = teor de umidade de equilíbrio, base seca, decimal;

U_0 = teor de umidade inicial, base seca, decimal.

2 - A temperatura do grão é igual à temperatura do ar que o envolve.

3 - O teor de umidade de equilíbrio do produto, para determinada condição do ar de secagem, é representado por:

$$(1 - UR) = \exp[-K \cdot (T + C) \cdot (U_e)^N] \quad (\text{Eq. 3})$$

em que

UR = umidade relativa do ar, decimal;

K, C e N = são constantes que dependem do produto;

T = temperatura do ar, °C.

4 - O calor latente de vaporização da água no milho é dado por:

$$h_{fg} = (2502,2 - 2,39 \cdot T) \cdot (1,0 + E \cdot \exp(F \cdot U)) \quad (\text{Eq. 4})$$

em que

E, F = são constantes que dependem do produto;
 h_{fg} = calor latente de vaporização, kJ.kg^{-1} .

5 - O calor específico do produto é representado pela equação :

$$C_p = (M + N.U) \quad (\text{Eq. 5})$$

em que

M, N = são constantes que dependem do produto;
 C_p = calor específico do produto, $\text{kJ.kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Temperatura do ar de secagem

A temperatura de equilíbrio entre o ar de secagem e o produto foi calculada por meio da equação de balanço de calor. Devido ao calor sensível do ar ser usado para evaporar a umidade do grão, esta temperatura é menor do que a temperatura do ar aquecido entrando na camada. Thompson (1968) determinou a seguinte expressão, utilizando o balanço de calor:

$$T_e = \frac{(0,24 + 0,45.W_0).T_0 + C_p.\Phi_0}{(0,24 + 0,45.W_0 + C_p)} \quad (\text{Eq. 6})$$

em que

W_0 = razão de umidade do ar antes da secagem, kJ.kg^{-1} ;
 T_0 = temperatura do ar antes da secagem, $^\circ\text{C}$;
 C_p = calor específico do produto, $\text{kJ.kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
 Φ_0 = temperatura do grão antes da secagem, $^\circ\text{C}$;
 T_e = temperatura de equilíbrio, $^\circ\text{C}$.

Umidade removida

Para determinar a quantidade de umidade removida de cada camada, é necessário conhecer o teor de umidade inicial do grão e a temperatura do ar na saída. O teor de umidade de equilíbrio do produto (U_e) foi calculado usando a temperatura de equilíbrio da Eq. 5, empregando a Eq.2 na seguinte forma:

$$U_e = \left[\frac{-\ln(1-UR)}{K.(T_e + C)} \right]^{1/N} \quad (\text{Eq. 7})$$

Em um processo de secagem em camada espessa, a temperatura do ar de secagem (T_e), em uma dada localização da camada de grãos, usualmente, muda com o processo de secagem. Thompson et al. (1968) usaram o tempo de secagem equivalente dado pela Eq. 1 e determinaram uma nova curva de secagem, depois de cada incremento de tempo. A razão de umidade e o presente período de secagem foram calculados usando a Eq. 1 adotando o tempo de secagem equivalente mais o intervalo de tempo de secagem, Δt . O teor de umidade final da camada foi, portanto, calculado pela razão de umidade.

Temperatura final do ar e do grão

Depois que a umidade é removida, a temperatura final do ar e do grão pode ser determinada mais corretamente levando em consideração o calor de vaporização da água no grão:

$$T_f = \frac{[(0,24 + 0,45.W_0).T_e - \Delta W.(587,9 + \Delta h_{fg} - \Phi_e) + C_p.\Phi_e]}{(0,24 + 0,45.W_f + C_p)} \quad (\text{Eq. 8})$$

Nesta equação, assume-se que $\Phi_e = T_e$

O incremento da razão de umidade do ar é dado por:

$$W = \frac{(U_0 - U_f).R_c}{G_a.t} \quad (\text{Eq. 9})$$

em que,

R_c = razão entre a quantidade de matéria seca do produto em uma camada e a quantidade de ar seco que a atravessa no intervalo de tempo Δt , kg de matéria seca/ kg de ar seco;
 G_a = fluxo de ar de secagem, $\text{m}^3 \text{.min}^{-1} \text{.m}^{-2}$.

Na Tabela 1, são apresentadas as equações de calor específico, umidade de equilíbrio e calor latente de vaporização e na Tabela 2, as equações de camada fina utilizadas nos modelos de secagem em secador de camada estacionária de acordo com o modelo de Thompson et al. (1968).

Tabela 1 - Equações utilizadas para a simulação de secagem em secador de camada estacionária, utilizando o modelo de Thompson para arroz, café, feijão, milho, milho branco, soja e trigo

Produto	Equação	Fonte
Calor Específico		
Arroz	$C_p = 0,278 + 0,960.(U/(100+U))$	Cavalcanti Mata (1992)
Café	$C_p = 0,461 + 6,86.(U/100)$	Rossi e Roa (1980)
Feijão	$C_p = 0,1452 + 0,661.(U/(100+U))$	Moraes Neto et al. (1992)
Milho	$C_p = 0,35 + 0,851.(U/(100+U))$	Brokker et al. (1992)
Milho branco	$C_p = 0,3687 + 0,941.(U/(100+U))$	Cavalcanti Mata (1993)
Trigo	$C_p = 0,288 + 0,828.(U/(100+U))$	ASAE-Standard (1984)
Soja	$C_p = 0,391 + 0,461.(U/(100+U))$	ASAE-Standard (1984)
Umidade de Equilíbrio		
Arroz	$U_e = (\ln(1-UR)/(1,9187 \cdot 10^{-5} \cdot (T+51,161)))^{0,409}$	ASAE-Standard (1984)
Café	$\% U_e = (15272 \cdot UR - 32478 \cdot UR^2 + 33341 \cdot UR^3) \cdot \exp((-0,029458 - 0,0016309 \cdot UR - 0,013695 \cdot UR^2 + 0,013205 \cdot UR^3) \cdot (t+273))$	Rossi e Roa (1980)
Feijão	$U_e = (\ln(1-UR)/(2,09 \cdot 10^{-5} \cdot (T+254,23)))^{0,5316}$	ASAE-Standard (1984)
Milho	$U_e = 120,6 \cdot [(-\ln(1-UR) / (T + 45,6))]^{0,5}$	Thompson et al. (1968)
Milho Branco	$U_e = (146,815 \cdot U - 367,282 \cdot UR^2 + 253,824 \cdot UR^3) \cdot \exp((0,0067325 - 0,213 \cdot UR + 0,7824 \cdot UR^2 - 0,0937134 \cdot UR^3 + 0,367517 \cdot UR^4) \cdot (T+10,8544))$	Braga (1991)
Trigo	$U_e = (\ln(1-UR)/(1,2299 \cdot 10^{-5} \cdot (T+64,346)))^{0,3912}$	ASAE-Standard (1984)
Soja	$U_e = (\ln(1-UR)/(30,533 \cdot 10^{-5} \cdot (T+134,13)))^{0,8221}$	ASAE-Standard (1984)
Calor Latente de Vaporização		
Arroz	$hfg = (597,6 - 0,57 \cdot t) \cdot (1 + 2,0692 \cdot \exp(-0,2174 \cdot m))$	Brokker et al. (1992)
Café	$hfg = (597,6 - 0,57 \cdot t) \cdot (1 + 0,9036 \cdot \exp(-0,0603 \cdot m))$	Rossi e Roa (1980)
Feijão	$hfg = (597,6 - 0,57 \cdot t) \cdot (1 + 1,912 \cdot \exp(-0,15655 \cdot m))$	Brokker et al. (1992)
Milho	$hfg = (597,6 - 0,57 \cdot t) \cdot (1 + 4,350 \cdot \exp(-0,28352 \cdot m))$	Brokker et al. (1992)
Milho Branco	$hfg = (597,6 - 0,57 \cdot t) \cdot (1 + 2,11 \cdot \exp(-0,19099 \cdot m))$	Cavalcanti Mata (1993)
Trigo	$hfg = (597,6 - 0,57 \cdot t) \cdot (1 + 1,2287 \cdot \exp(-0,1761 \cdot m))$	Brokker et al. (1992)
Soja	$hfg = (597,6 - 0,57 \cdot t) \cdot (1 + 0,7001 \cdot \exp(-0,1497 \cdot m))$	Brokker et al. (1992)

Tabela 2 - Equações de camadas finas utilizadas para a simulação de secagem em secador de camada estacionária, utilizando o modelo de Thompson para arroz, café, feijão milho, milho branco, soja e trigo

EQUAÇÕES DE CAMADA FINA ($t = A \cdot \ln(RU) + B \cdot (\ln(RU))^2$)	
Arroz	Cavalcanti Mata (1992)
$A = (-2445,06 + 82,79.T - 1,023.T^2 + 0,004267.T^3)/60$ $B = (-449,68 + 14,52.T - 0,182.T^2 + 0,000756.T^3)/60$	
Café	Rossi e Roa (1980)
$A = (-6778 + 227,06.T - 2,78.T^2 + 0,011975.T^3)/60$ $B = (553,52 - 18,13.T + 0,211.T^2 - 0,0008658.T^3)/60$	
Milho	Thompson et al. (1968)
$A = -1,706 + 0,0088.T$ $B = 148,7 \cdot \exp(-0,059.T)$	
Milho Branco	Cavalcanti Mata (1993)
$A = -0,6916.T - 17,2299.U_o - 0,0078733.T^2 - 0,0075508.U_o^3 + 7,079.T.U_o^{0,6674}$ $B = 0,843192.10^{10} \cdot T^{-2,6932} \cdot U_o^{-2,2918}$	
Feijão	Neto et al. (1993)
$A = -19,72 + 0,16879.T + 0,942156.U_o - 0,00087.T^2 - 0,01541.U_o^2 - 0,0013624.T.U_o$ $B = \text{EXP}(138,67 - 14,5935.U_o - 0,00034.T^2 + 0,5163.U_o^2 - 0,006055.U_o^3)$	
Trigo- dados convertidos da secagem com trigo soft	Brokker et al. (1992)
$A = -1,6023 + 0,008801.T - 0,000335.T^2 + 0,000002777.T^3$ $B = 0,497 \cdot \exp(-(T-32,2)/1,888) + 0,1027 \cdot \exp(-(T-32,2)/40,22)$	
Soja	Cavalcanti Mata (1992)
$A = 0,17359 - 0,0297.T + 0,0006027.T^2 - 0,00000333.T^3$ $B = -0,2661 + 0,2116.T - 0,00454.T^2 + 0,00002549.T^3$	

Modelo de Hukill

Hukill (1974) desenvolveu uma expressão analítica para a distribuição de umidade em grãos, relacionada com a altura total da camada de produto e com o tempo de secagem, desprezando o calor sensível dos grãos e admitindo que a temperatura do ar de secagem decresce, exponencialmente, à medida que o ar vai passando pela massa de grãos. O autor considerou, no balanço de energia, que o calor para vaporização da umidade do grão é igual ao calor sensível perdido na passagem do ar através dos grãos.

Para isso considerou uma camada fina de grãos com espessura δx e de uma altura (x) no silo. Durante um pequeno intervalo de tempo δt , o teor de umidade U decresce rapidamente de uma quantidade δU . A quantidade de calor necessário para diminuir o teor de umidade é dado pelo produto da quantidade de água evaporada e o calor de vaporização. Isto pode ser expresso por:

$$Q = D_m \cdot S \cdot \delta x \cdot (\delta U/100) \cdot h_{fg} \quad (\text{Eq. 10})$$

em que

Q = calor de vaporização, kJ;
 D_m = densidade dos grãos, kg de matéria seca/m³;
 S = área, m²;
 x = distância do ponto de entrada do ar até o grão,
 m

Durante o mesmo intervalo de tempo, a movimentação do ar através da camada fina provoca uma pequena diminuição da temperatura (δT). A perda de calor associado a esta diminuição de temperatura é dado pelo produto da massa de ar, passando através da camada fina, durante o intervalo de tempo (δt), o calor específico do ar e a queda de temperatura. Isto pode ser dado pela seguinte equação:

$$Q' = 60 \cdot G_m \cdot S \cdot \delta t \cdot C_p \cdot \delta T \quad (\text{Eq. 11})$$

em que

Q' = calor sensível, kJ;
 G_m = fluxo de massa de ar, kg.h⁻¹

Como foi considerado o calor de vaporização igual ao calor sensível do ar ($Q = Q'$), tem-se:

$$D_m \cdot S \cdot \delta x \cdot (\delta U / 100) h_{fg} = 60 \cdot G_m \cdot S \cdot \delta t \cdot C_p \delta T \quad (\text{Eq. 12})$$

Além do calor sensível do grão, a condução e pequenas radiações de calor são desprezadas, com isso tem-se:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{6000 \cdot G_m \cdot C_p}{D_m \cdot h_{fg}} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Eq. 13})$$

Esta expressão pode ser escrita como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = P \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Eq. 14})$$

em que P é uma constante, estabelecida para uma dada condição de secagem, definida por:

$$P = \frac{6000 \cdot G_m \cdot C_p}{D_m \cdot h_{fg}} \quad (\text{Eq. 15})$$

A Eq. 14 mostra que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre as temperaturas do ar imediatamente acima e abaixo de uma camada fina de espessura δx , considerando desprezíveis as trocas

de calor nas paredes do silo e a variação do calor sensível dos grãos.

A relação, entre o teor de umidade dos grãos e o tempo durante os processos de secagem em camada fina, ou seja, processos onde cada parte da massa de grãos está em contato com o ar nas condições iniciais, é dado pela seguinte expressão:

$$U - U_e = \Delta U \cdot \exp(-K \cdot t) \quad (\text{Eq. 16})$$

A relação entre a temperatura do ar de secagem e a profundidade de grãos (espessura da camada) é dada pela seguinte expressão:

$$T - T_g = \Delta T \cdot \exp(-R_f \cdot x) \quad (\text{Eq. 17})$$

em que T_g é a temperatura do grão °C.

A partir destas condições, pode-se derivar a expressão para o teor de umidade do grão com o tempo, em alguma parte do silo, na qual as condições iniciais do ar são constantes como também a velocidade através da massa de grãos. Hukill encontrou uma expressão para a umidade (U) em função do tempo (t) e da profundidade (x), além de uma expressão em função dos mesmos parâmetros para a temperatura do ar. A seguir são descritas as condições de contorno e as expressões obtidas por Hukill (1974).

condição 1:

$$t = 0, U = U_0 \quad T = T \cdot \exp(-R_f \cdot x) + T_g \quad (\text{Eq. 18})$$

condição 2:

$$T = \infty, U = U_e$$

condição 3:

$$x = 0, T = T_0 \quad U = U \cdot \exp(-K \cdot t) + U_e \quad (\text{Eq. 19})$$

condição 4:

$$x = \infty, T = T_g$$

Para alguns valores de t e x , tem-se

$$\frac{\partial U}{\partial t} = P \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{Eq. 20})$$

para essa condição as expressões são:

$$U = (U_0 - U_e) \cdot \frac{e^{c \cdot x}}{e^{c \cdot x} + e^{K \cdot t} + 1} + U_e \quad (\text{Eq. 21})$$

$$T = (T_0 - T_g) \cdot \frac{e^{-c \cdot x}}{e^{-c \cdot x} + e^{K \cdot t} + 1} + T_g \quad (\text{Eq. 22})$$

em que

$$c = \frac{K \cdot (U_0 - U_e)}{P \cdot (T_0 - T_g)} \quad (\text{Eq. 23})$$

Para simplificar a equação da umidade, o autor definiu o teor de umidade, temperatura, tempo e profundidade como parâmetros adimensionais. Adimensionalizando o teor de umidade dos grãos (razão de umidade) tem-se:

$$RU = (U - U_e) / (U_0 - U_e) \quad (\text{Eq. 24})$$

onde $RU = 1$ antes da secagem ($t = 0$) e $RU = 0$ ($t = \infty$) para o equilíbrio higroscópico.

O tempo pode ser expresso em termos de períodos de meia resposta. Isto é, o período H , em horas, é o tempo necessário para que os grãos tenham uma razão de umidade de 0,5. Consequentemente $e^{-KH} = 0,5$ ou $e^{KH} = 2$ e tem-se o tempo, em período de meia resposta (adimensional de tempo):

$$Y = \frac{t}{H} \quad (\text{Eq. 25})$$

Segundo Queiroz et al. (1982), o tempo de meia-resposta (H) pode ser determinado por meio de regressão linear, mediante os dados de Brooker *et al.* (1974) e pode ser estimado pela seguinte equação:

$$H = \exp(2,413 - 0,016 \cdot U_{bu} + 0,003 \cdot T - 0,001 \cdot U_{bu} \cdot T) \quad (\text{Eq. 26})$$

em que U_{bu} é o teor de umidade em percentual base úmida.

A umidade equivalente a um fator profundidade D (adimensional de profundidade) e pode ser definido como a profundidade da camada de grãos para a qual o calor necessário para evaporação da umidade inicial ($RU_0 = 1$) até a umidade final ($RU_f = 0$), é igual ao calor sensível fornecido pelo ar por unidade de tempo. Assim, o adimensional de profundidade é dado por:

$$D = \frac{x \cdot D_m \cdot h_{fg} \cdot (U_0 - U_e)}{6000 \cdot G_a \cdot C_p \cdot H \cdot (T_0 - T_e)} \quad (\text{Eq. 27})$$

em que

G_a = fluxo de ar seco, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

A equação geral proposta por Hukill para descrever a secagem de uma massa de grãos é então a seguinte:

$$RU = \frac{2^D}{2^D - 2^Y - 1} \quad (\text{Eq. 28})$$

As Figuras 6 e 7 mostram as telas de entrada e saída de dados para a simulação de secagem em camada estacionária pelos modelos de Thompson e Hukill, respectivamente.

Software Aplicativo 'a Secagem de Grãos SASG (Vers. 1.0)

Modelo de INDMISDN: SECA6CM EM LIJTO FIKO <Comun>

Entre com os dados abaixo:

Teor de Umidade Inicial do Produto [2 b.s.]: 25.0000
 Fluxo de Ar de Secagem [m³/min/m²]: 30.0000
 Teor de Umidade Final [2 b.s.]: 15.0000
 Altura Total da Camada de Grãos [m]: 1.0000
 Incremento de Tempo [h]: 1

Temperatura Inicial do Produto [°C]: 25.0000
 Temperatura do AR na Entrada do Secador [°C]: 60.0000
 Razão da Mistura do AR de Secagem [kg(H₂O)/kg(Ar)]: 0.0149
 Volume Específico do AR [m³/kg(Ar)]: 0.9665

Use: [F1] para SELECIONAR ... [ENTER] para EXECUTAR

Software Aplicativo 'a Secagem de Grãos SASG (Vers. 1.0)

Modelo de INDMISDN: SECA6CM EM LIJTO FIKO <Comun>

Hora ---->	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
[Uz b.s. ->	19.43	16.75	14.95	13.62	12.60
Temp. ---->	40.35	55.17	57.11	57.92	58.37
[Uz h.s. ->	21.11	18.42	16.45	14.45	13.77
Temp. ---->	40.35	49.91	53.73	55.50	56.48
[Uz b.s. ->	22.20	19.00	17.70	16.10	14.09
Temp. ---->	34.89	44.85	50.88	52.80	54.38
[Uz b.s. ->	23.21	20.97	18.99	17.33	15.97
Temp. ---->	31.32	40.27	46.35	49.91	52.09
[Uz h.s. ->	24.89	22.19	20.22	18.51	17.07
Temp. ---->	30.30	35.59	42.44	46.84	49.61
Media [Uz b.s.]	22.18	19.63	17.68	16.12	14.86

Tecla: [QUALQUER] Tecla 1

Figura 6 - Telas dos dados de entrada e saída para a simulação de secagem em camada estacionária pelo modelo de Thompson.

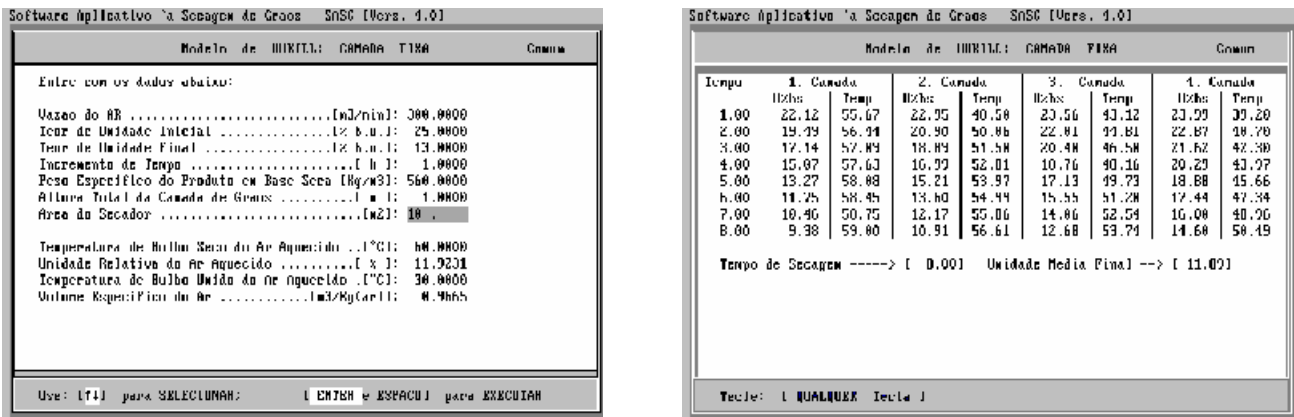


Figura 7 - Telas dos dados de entrada e saída para a simulação de secagem em camada estacionária pelo modelo de Hukill

Simulação de secagem de grãos em secador de fluxo cruzado

Para a simulação de secagem de produtos agrícolas em secador de fluxo cruzado, utiliza-se as mesmas equações descritas nas Tabelas 1 e 2, embora conceitualmente exista um deslocamento da mas-

sa de grãos no sentido vertical e um fluxo de ar passando pelos grãos no sentido transversal. A Figura 8 mostra este conceito e um exemplo de secador a ser simulado com dados reais para secagem de milho. A Figura 9 mostra as telas dos dados de entrada e saída para essa simulação.

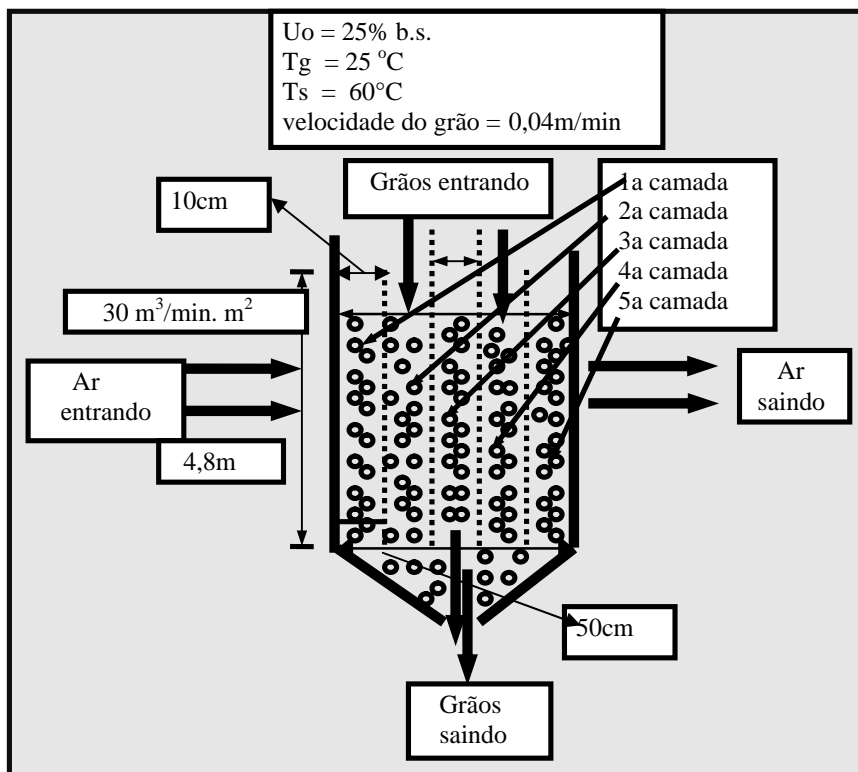


Figura 8 – Esquema básico de um secador de coluna de fluxo cruzado

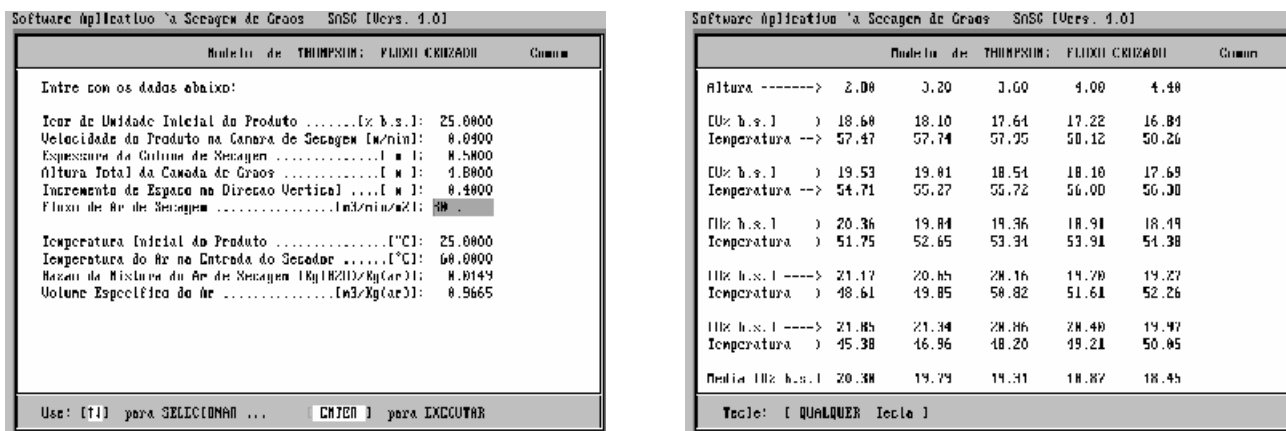


Figura 9 - Telas dos dados de entrada e saída para a simulação de secagem em secador de fluxo cruzado pelo modelo de Thompson.

Simulação de secagem de grãos em secador de fluxo concorrente

A simulação de secagem de produtos agrícolas em secadores de fluxo concorrente utilizam as mesmas equações das Tabelas 1 e 2, mas neste caso os grãos se deslocam no sentido vertical descendente

e o ar no mesmo sentido, embora a velocidade de deslocamento do ar seja bem superior à dos grãos. Na Figura 10 é configurado o esquema de um secador de fluxo concorrente e na Figura 11 são mostradas as telas dos dados de entrada e saída para simulação de secagem para o caso do milho.

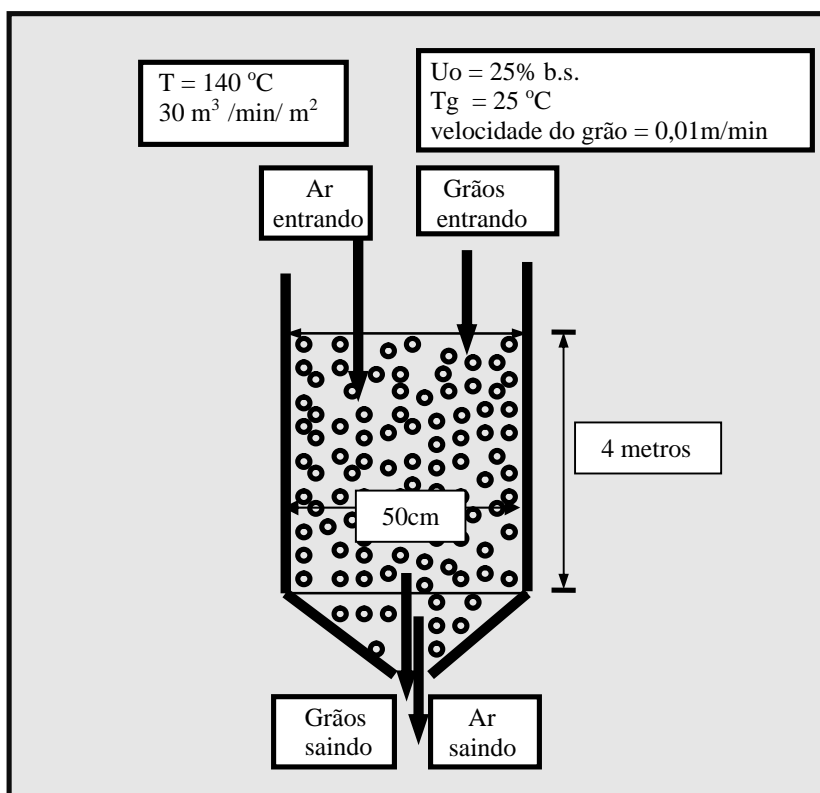


Figura 10 – Esquema básico de um secador de fluxo concorrente.

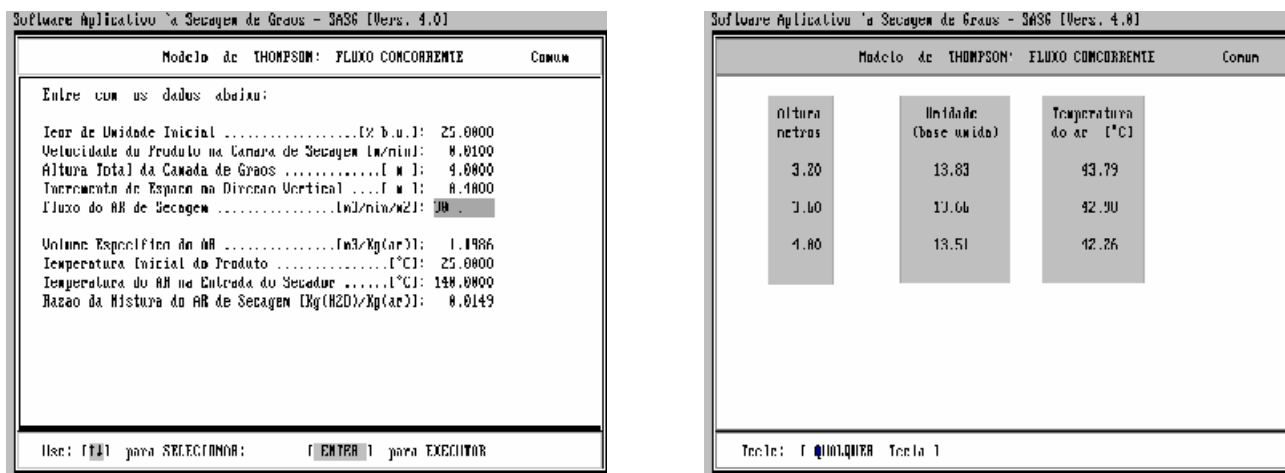


Figura 11 - Telas dos dados de entrada e saída para a simulação de secagem em secador de fluxo concorrente pelo modelo de Thompson.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de testar o programa foram comparados os dados fornecidos pelo programa de simulação de secagem de grãos nas suas opções existentes, com os dados obtidos em literatura.

Psicrometria

Alguns dados de psicrometria fornecidos pelo programa foram comparados com os obtidos por Biagi e Dalbello (1994) e com a carta psicrométrica da ASHRAE citada pelos mesmos autores. Na Tabela 3 e 4 são feitas essas comparações para condições de propriedades psicrométricas independentes do ar e para o processo de aquecimento do ar necessário à secagem de grãos, respectivamente.

Tabela 3 - Propriedades psicrométricas independentes

Dados de entrada: Temperatura de bulbo seco = 25 °C
Umidade relativa do ar = 75%

Variáveis	Pressão - 760 mm Hg				Pressão - 695,10 mm Hg			
	Biagi e Dalbello	Programa	ASHRAE	%	Biagi e Dalbello	Programa	ASHRAE	%
Temperatura de b.s.(°C)	25,00	25,00	25,00	-	25,00	25,00	25,00	-
Temperatura de b.u.(°C)	20,97	20,93	21,00	0,33	20,97	20,86	20,97	0,52
Temperatura de Orvalho (°C)	19,14	19,12	19,00	0,63	19,14	19,12	19,14	0,10
Umidade Relativa (%)	70,00	70,00	70,00	-	70,00	70,00	70,00	-
Umidade absoluta (g água/ kg de ar seco)	13,89	13,90	14,00	-	15,20	15,30	15,30	-
Entalpia (kJ/ kg de ar seco)	60,58	60,54	61,00	0,75	63,97	64,00	62,39	2,58
Volume específico (m ³ / kg de ar seco)	0,86	0,863	0,863	-	0,95	0,946	0,946	-

Tabela 4 - Propriedades psicrométricas para o ar aquecido

Dados de entrada: Temperatura de bulbo seco = 25 °C Umidade relativa do ar = 75%
 Temperatura do ar aquecido = 60 °C
 Pressão - 760 mm Hg

Variáveis	Biagi e Dalbello	Programa	ASHRAE	%
Temperatura de bulbo seco (°C)	45,00	45,00	45,00	-
Temperatura de bulbo úmido (°C)	26,44	26,25	26,40	0,57
Temperatura de Orvalho (°C)	19,14	19,12	19,0	0,10
Umidade Relativa (%)	23,18	23,6	23,5	0,42
Umidade absoluta (g de vapor de H ₂ O/ kg de ar seco)	13,89	13,90	14,00	0,72
Entalpia (kJ/ kg de ar seco)	81,24	84,70	82,00	3,29
Volume específico(m ³ / kg de ar seco)	0,92	0,92	0,92	-

Na Tabela 3, observa-se que, para a pressão atmosférica de 760 mm Hg, o maior percentual de diferença entre o programa e a carta Psicrométrica da ASHRAE é de 0,75% para a Entalpia, e de 2,58% para a pressão atmosférica de 695,10 mm Hg, podendo ainda ser considerado um bom ajuste. Estes dados estão bem coerentes com os observados por Biagi e Dalbello (1994) que encontraram a maior diferença entre os dados do programa e da carta psicrométrica da ASHRAE de 2,48% para a entalpia. Na Tabela 4, que mostra um exemplo de aquecimento do ar para 45°C, observa-se que a maior diferença encontrada é ainda para a entalpia que foi de 3,29%.

Simulação de secagem em secador de camada estacionária

As Tabelas de 5 a 11 mostram a secagem de arroz, café, feijão, milho, milho branco, soja e trigo em secador de camada estacionária, respectivamente. Observa-se nestas Tabelas que a maior defasagem entre os dados de literatura e o programa ocorreu, quando o produto era o arroz, para o qual obteve-se uma previsão de secagem de 18 horas para as condições do ar de 40 °C de temperatura e 50% de umidade relativa, enquanto o tempo de secagem simulado pelo programa foi de 15 horas. Contudo, segundo Caneppele et al. (1993), os autores do trabalho, esses dados superestimam a secagem experimental o que vem confirmar que o programa

tem um erro relativo bem inferior a 20 %, pois se essa diferença fosse de 2 horas ou menos o erro relativo já seria de 11%, o que seria bem mais razoável.

O programa foi elaborado com equações que têm validade para a secagem com temperaturas entre 40 e 80 °C, embora em alguns casos, como o do milho, essas equações têm validade acima desses valores, podendo a secagem ser feita até a temperatura de 120 °C. O programa é aberto, permitindo a colocação de valores acima ou abaixo da faixa de validade, para que o usuário possa estudar uma extrapolação de dados, contudo como a equação utilizada é a de Thompson que é uma equação de 2º grau, pode haver inconsistência de dados. Neste caso a simulação deve ser desprezada ou as equações substituídas por outra mais representativa.

À medida que os trabalhos de pesquisa sobre secagem evoluem em todo o país é importante poder incorporar equações para diferentes produtos ou mesmo para grãos já citados mas de variedades diferentes, de modo a dar corpo ou opções para este programa.

Na Tabela 12 apresenta-se os resultados da secagem de milho simulada pelo modelo de Hukill, cujos dados para os intervalos de temperaturas estudados são plenamente satisfatórios havendo apenas um pequeno desvio de 1,28% para a secagem a 40°C quando se compara a umidade final fornecida pela Literatura com a calculada pelo programa.

Tabela 5 - Dados experimentais e simulados pelo programa para secagem de **arroz** em secador de camada estacionária - Modelo de Thompson.

	Espessura da camada (cm)	Umidade Inicial - final	Umidade Inicial - final	Tempo de secagem (h)	Tempo de secagem (h)
		% base secas	% base seca	Literatura ⁽¹⁾	Programa
		Literatura ⁽¹⁾	Programa	Literatura ⁽¹⁾	Programa
40 °C	10	30 - 12,1	30 - 11,5	11	11
UR=50%	15	30 - 15	30 - 15,0	18	15
60 °C	10	30 - 15	30 - 14,6	8	7
UR=19%	15	30 - 15	30 - 14,9	10	10
80 °C	10	30 - 15	30 - 14,4	11	11
UR=8%	15	30 - 15	30 - 14,2	6	5

⁽¹⁾ Caneppele et al. (1993)

Tabela 6 - Dados experimentais e simulados pelo programa para secagem de **café** em secador de camada estacionária - Modelo de Thompson.

	Espessura da camada (cm)	Umidade Inicial - final	Umidade Inicial - final	Tempo de secagem (h)	Tempo de secagem (h)
		% base secas	% base seca	Literatura	Programa
		Literatura	Programa	Literatura	Programa
54 °C UR=17,4%	20 ⁽¹⁾	108 - 15	108 - 15	45	43
70 °C UR=10,9%	20 ⁽²⁾	30 - 15	30 - 15,1	21	21
80 °C UR=8,1%	20 ⁽²⁾	30 - 15	30 - 14,8	14	14

⁽¹⁾ Rossi e Roa (1980) ⁽²⁾ Cavalcanti Mata (1992)

Tabela 7 - Dados experimentais e simulados pelo programa para secagem de **feijão** em secador de camada estacionária - Modelo de Thompson.

	Espessura da camada (cm)	Umidade Inicial - final	Umidade Inicial - final	Tempo de secagem (h)	Tempo de secagem (h)
		% base secas	% base seca	Literatura ⁽¹⁾	Programa
		Literatura ⁽¹⁾	Programa	Literatura ⁽¹⁾	Programa
40 °C UR=50%	80 ⁽¹⁾	22 - 13	22 - 13	26	25
60 °C UR=19%	60 ⁽²⁾	30 - 15	30 - 14,0	5	5
80 °C UR=8%	40 ⁽²⁾	30 - 15	30 - 14,3	2,5	2,5

⁽¹⁾ Roa e Macedo (1976) ⁽²⁾ Cavalcanti Mata (1992)

Tabela 8 - Dados experimentais e simulados pelo programa para secagem de **milho** em secador de camada estacionária - Modelo de Thompson.

	Espessura da camada (cm)	Umidade Inicial - final % base secas	Umidade Inicial - final % base seca	Tempo de secagem (h)	Tempo de secagem (h)
		Literatura ⁽¹⁾	Programa	Literatura ⁽¹⁾	Programa
40 °C UR=28%	40	25 - 15	25 - 15	14	14
60 °C UR=9,7%	40	25 - 15	25 - 14,9	5	5
80 °C UR=4,1%	40	25 - 15	25 - 14,9	3	3

⁽¹⁾ Queiroz et al. (1993)

Tabela 9 - Dados experimentais e simulados pelo programa para secagem de **milho branco** em secador de camada estacionária - Modelo de Thompson

	Espessura da camada (cm)	Umidade Inicial - final % base secas	Umidade Inicial - final % base seca	Tempo de secagem (h)	Tempo de secagem (h)
		Literatura ⁽¹⁾	Programa	Literatura ⁽¹⁾	Programa
40 °C UR=30%	64	31,6 - 15	30 - 15	8	8
60 °C UR=13%	64	30 - 15	30 - 15	3,5	3,2
80 °C UR=4,5%	64	36 - 15	30 - 15,17	2,8	2,8

⁽¹⁾ Cavalcanti Mata (1993)

Tabela 10 - Dados experimentais e simulados pelo programa para secagem de **soja** em secador de camada estacionária - Modelo de Thompson.

	Espessura da camada (cm)	Umidade Inicial - final % base secas	Umidade Inicial - final % base seca	Tempo de secagem (h)	Tempo de secagem (h)
		Literatura ⁽¹⁾	Programa	Literatura ⁽¹⁾	Programa
40 °C UR=32%	60	30 - 15	30 - 14,95	5,5	5,5
60 °C UR=12%	60	30 - 15	30 - 14,85	2,8	2,8
80 °C UR=5%	60	30 - 15	30 - 14,4	2,0	2,0

⁽¹⁾ Cavalcanti Mata (1992)

Tabela 11 - Dados experimentais e simulados pelo programa para secagem de **trigo** em secador de camada estacionária - Modelo de Thompson.

	Espessura da camada (cm)	Umidade Inicial - final	Umidade Inicial - final	Tempo de secagem (h)	Tempo de secagem (h)
		% base secas	% base seca		
		Literatura ⁽¹⁾	Programa	Literatura ⁽¹⁾	Programa
40 °C	10	30 - 12,1	30 - 11,5	11	11
UR=50%	15	30 - 15	30 - 15,0	18	15
60 °C	10	30 - 15	30 - 14,6	8	7
UR=19%	15	30 - 15	30 - 14,9	10	10
80 °C	10	30 - 15	30 - 14,4	11	11
UR=8%	15	30 - 15	30 - 14,2	6	5

⁽¹⁾ Brooker et al. (1992)

Tabela 12 - Dados experimentais e simulados pelo programa para secagem de milho em secador de camada estacionária.- Modelo de Hukill.

	Espessura da camada (cm)	Umidade Inicial - final	Umidade Inicial - final	Tempo de secagem (h)	Tempo de secagem (h)
		% base secas	% base seca		
		Literatura ⁽¹⁾	Programa	Literatura ⁽¹⁾	Programa
40°C e UR=50%	40	25 - 15	25 - 14,8	14	14
60 °C e UR=19%	50	33 - 15	33 - 15	7	7
80 °C e UR=8%	40	25 - 15	25 - 15	3	3

⁽¹⁾ Brooker et al. (1992)

Simulação de secagem em secador de fluxo cruzado

Na Tabela 13, observa-se um exemplo de uma simulação de secagem relatada por Queiroz *et alii* (1982) em um secador de fluxo cruzado, com uma coluna de 4 metros de altura, utilizando o modelo de Thompson a uma temperatura de 80 °C e 3,8% de umidade relativa do ar.

Depois de 2 horas de secagem, a última camada do milho sai do secador com 12,06% de umidade base seca, sendo obtido pelo programa 12,1%

b.s., o que representa uma diferença mínima, sem significância prática. Como, teoricamente, as equações de calor específico, calor latente de vaporização, equilíbrio higroscópico e camada fina, que são necessárias ao balanço de calor e massa pelo modelo de Thompson, são as mesmas utilizadas na secagem de camada estacionária, neste programa foi incorporado as opções para que sejam feitas as simulações em secador de fluxo cruzado para todos os produtos estudados, no entanto o modelo só foi testado para milho.

Tabela 13 - Dados experimentais e simulados pelo programa para secagem de milho em secador de fluxo cruzado - Modelo de Thompson.

Discriminação	Literatura⁽¹⁾	Programa
Temperatura do ar de secagem (°C)	80	80
Umidade Relativa do ar de secagem (%)	3,8	3,8
fluxo de ar (m ³ /min/m ²)	20	20
Velocidade do grão no secador (m/min.)	0,033	0,033
Altura da camada de grãos (m)	4,0	4,0
Espessura da coluna do secador (m)	0,25	0,25
Umidade Inicial do grão (% base seca)	22	22
Umidade Final do grão (% base seca)	15	15
Tempo de secagem (h)	2,0	2,0
Umidade do grão após a secagem (% base seca)	12,06	12,10

⁽¹⁾ Queiroz et al. (1982)

Simulação de secagem em secador de fluxo concorrente

Na Tabela 14, estão os dados obtidos por Queiroz et al. (1982) e pelo programa de simulação para secagem de milho em secador de fluxo concorrente.

Observa-se que a umidade final difere de 0,12 pontos percentuais que representa um erro relativo de 0,78%, que é considerado muito pequeno e valida a simulação para milho em secador de fluxo concorrente.

Da mesma forma que o descrito, para a simulação de secagem em secador de fluxo cruzado, para a simulação em secador de fluxo concorrente, é necessário testar o modelo para os outros produtos diferentes do milho. Portanto, é importante que o programa seja utilizado pelo maior número possível de pesquisadores, visando a dar a ele mais consistência e auxiliar na obtenção de um programa de simulação de secagem que atenda as necessidades de um maior número possível de usuários.

Tabela 14 - Dados experimentais e simulados pelo programa para secagem de **milho** em secador de fluxo concorrente - Modelo de Thompson

Discriminação	Literatura⁽¹⁾	Programa
Temperatura do ar de secagem (°C)	150	150
Umidade Relativa do ar de secagem (%)	0,4	0,4
fluxo de ar (m ³ /min/m ²)	30	30
Velocidade do grão no secador (m/min.)	0,017	0,017
Altura da camada de grãos (m)	1,0	1,0
Temperatura inicial do produto (°C)	20	20
Umidade Inicial do grão (% base seca)	22	22
Umidade Final do grão (% base seca)	15,43	15,31
Tempo de secagem (h)	1,0	1,0

⁽¹⁾ Queiroz et al. (1993)

CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

1. programa desenvolvido simula satisfatoriamente os processos psicrométricos para secagem de produtos agrícolas na faixa de temperatura de 1

a 150 °C, utilizando como alternativa a pressão barométrica local;

2. O programa permite uma simulação satisfatória do processo de secagem na faixa de temperatura de 40 a 80 °C, em secador de camada estacionária, pelo modelo de Thompson, para os produ-

tos arroz, café, feijão, milho, milho branco, soja e trigo e pelo modelo de Hukill para milho;

3. O programa simula o processo de secagem de milho em secador de fluxo cruzado e fluxo concorrente com alta precisão.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- ASAE **Standard, Engineering practices and data adopted by the American Society of Agricultural Engineers**. Published by American Society of Agricultural Engineers. 1984, 534p.
- Biagi, J.D.; Dalbello, O. Modelo psicrométrico para representar os processos de aquecimento, resfriamento, umidificação e mistura de dois ares **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, XXIII, 1994, Campinas. 10p.**
- Braga, M.E.D. **Estudo da histerese entre as isotermas de sorção e dessorção do milho BR-451**. Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, 1991, 78p. (Tese de Mestrado).
- Brooker, D.B.; Bakker-Arkema, F.W.; Hall, C.W. **Drying cereal grains**. Connecticut : The AVI, 1974, 265p.
- Brooker, D.B.; Bakker-Arkema, F.W.; Hall, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York : The AVI Van Nostrand Reinhold, 1992, 450p.
- Caneppele, C; Hara, T.; Martins, J.H.; Campelo Júnior, J.H. Simulação de secagem de arroz (*Oryza sativa* L.). **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, 1993, Ilhéus. Anais...** Ilhéus, BA: CEPLAC/SBEA, 1993. v. 2, p. 1080-1090.
- Cavalcanti Mata, M.E.R.M. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Campina Grande-PB : Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, Universidade Federal da Paraíba., 1992. 132 p. (Relatório de Pesquisa).
- Cavalcanti Mata, M.E.R.M. **Simulação de secagem de milho branco BR-451 em secador de camada estacionária**. Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, 1993, 140p. (Tese de Professor Titular).
- Hukill, W. V. Drying of grain. **In: Cristensen, C.M. Ed. Storage of cereal grains and their products**. 2 Ed. St. Paul, Minn. American Society of Cereal Chemists, 1974, p. 481-508.
- Nascimento, J.W.B.; Cavalcanti Mata, M.E.R.M.; Martins, J.H. Simulação de secagem de milho utilizando a energia térmica de um gasogênio de fluxo transversal descendente. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 20, 1991, Londrina-PR Anais...** Londrina : IAPAR/SBEA, 1992. v.1 p. 207-227, 1991
- Moraes Neto, J.M.; Martins, J.H.; Cavalcanti Mata, M.E.R.M. Secagem de feijão carioca em camada fina utilizando os modelos de Thompson e Page. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21, 1992, Santa Maria-RS. Anais...** Santa Maria : UFSM/ SBEA 1992. v.4, p.1958-1971.
- Queiroz, D.M.; Silva, J.S.; Melo, E.C. **Prática de simulação de secagem em calculadoras programáveis**. Viçosa, Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1982 84p. (Centreinar, n.3).
- Roa, G.; Macedo, I.C., **Drying of carioca dry beans with solar energy in a stationary bin**. American Society of Agricultural Engineers, Lincoln, Annual Meeting. Paper n° 76.3021. 1976.
- Rossi, S.J.; Roa, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural**. São Paulo : Academia de Ciências do Estado de São Paulo. 1980, 295p.
- Thompson, T.L.; Peart, R.M.; Foster, G.H. Mathematical simulation of corn drying a new model. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.11, n.4, p. 582-586, 1968.
- Wilhelm, L.R. Numerical calculation of psychometric properties in SI units. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.19, n.2, p. 318-325, 1976.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.