

# Simulação da secagem de grãos com baixas temperaturas utilizando-se o modelo de Hukill: uma nova abordagem

Daniela de Carvalho Lopes

Doutoranda e mestre em Engenharia Agrícola – UFV.  
daniclopes@bol.com.br, Viçosa [Brasil]

José Helvecio Martins

Doutor em Engenharia Agrícola – UP [Estados Unidos];  
Professor na graduação e pós-graduação – UFV.  
jhmartins@ufv.br, Viçosa [Brasil]

Antonio José Steidle Neto

Doutorando em Agronomia [Meteorologia Agrícola]  
e mestre em Engenharia Agrícola – UFV;  
steidle@vicosa.ufv.br, Viçosa [Brasil]

Antonio José Steidle Filho

Mestre em Educação – UNISAL;  
Professor na graduação – UNINOVE.  
steidler@uninove.br, São Paulo [Brasil]

Este trabalho apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento de um programa computacional para a simulação da secagem com baixas temperaturas em camadas estacionárias de grãos, com base no Modelo de Hukill. O programa computacional chamado SIMH foi escrito em linguagem Object Pascal e utiliza a plataforma de programação Delphi 5. A saída de dados do SIMH produz um perfil do processo de secagem de acordo com as condições fornecidas pelo usuário. Os resultados simulados pelo programa computacional desenvolvido apresentaram-se satisfatórios, com limites de erros aceitáveis para os processos de secagem considerados.

**Palavras-chave:** Modelo de Hukill. Programa computacional. Secagem. Simulação.



## 1 Introdução

A secagem é realizada com o objetivo de preparar um produto para a armazenagem, e envolve fenômenos de transferência de calor e de massa entre os grãos e o ar de secagem. Por meio desse processo remove-se umidade do grão, deixando-o em equilíbrio com o ar do ambiente de armazenamento, mas essa retirada deve ser feita de maneira que preserve a aparência, as qualidades nutritivas e a viabilidade como semente do produto armazenado (SILVA; QUEIROZ; SOUSA, 2000).

Quando o ar é forçado por uma massa de grãos, formam-se três áreas, cada uma com diferentes temperaturas e teores de umidade, à medida que as frentes de temperatura e umidade se movem na mesma direção do fluxo de ar por meio da massa de grãos (NAVARRO; NOYES, 2001). Durante esse processo, a temperatura e umidade do ar de secagem também variam continuamente. Portanto, uma maneira conveniente para analisar essas variações é desenvolver um programa computacional que simule as transferências de calor e de umidade em massas de grãos durante a secagem. Com os resultados obtidos, será possível estimar o tempo necessário para que essas frentes de temperatura e umidade passem completamente pela massa de grãos, prever o comportamento da temperatura e do teor de umidade do produto durante o processo e controlar de maneira mais eficiente a secagem.

A simulação se baseia em modelos, ou seja, em conjuntos de suposições, geralmente na forma de relações lógicas ou matemáticas, utilizadas para descrever como um sistema se comporta. Por meio da simulação, a avaliação do modelo pode ser realizada de maneira mais rápida e eficiente, gerando resultados que possibilitam estimar as características reais do processo. Dessa forma, evitam-se gastos exagerados na execução de um determinado experimento,

gasta-se menos tempo, e diferentes possibilidades podem ser analisadas para um mesmo processo (LAW; KELTON, 1991).

Com base nessa avaliação, desenvolveu-se um programa computacional para simulação da secagem com baixas temperaturas em camadas estacionárias de grãos armazenados com base no Modelo de Hukill. Este programa, denominado SIMH, apresenta uma nova abordagem na forma de exibir os resultados da simulação, facilitando a manipulação e a análise dos dados gerados. O formato da entrada de dados e a estrutura do programa possibilitam execuções de simulações para diversas situações de forma rápida e eficiente, facilitando também análises de sensibilidade. Este trabalho apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento desse programa computacional.

## 2 Material e métodos

Escrito em Object Pascal, o SIMH utiliza-se da plataforma de programação Delphi 5. Atualmente, o modelo proposto por Hukill (1974) é ainda bastante utilizado para a simulação da secagem, em razão dos resultados confiáveis apresentados quando é executado e também por se adaptar facilmente a diversos tipos de produtos agrícolas. A utilização da plataforma de programação Delphi possibilitou uma interface mais amigável com o usuário do programa, tanto na entrada quanto na saída de dados, além de viabilizar a criação de animações e gráficos, facilitando a análise dos dados gerados.

As equações utilizadas e a maneira como foram aplicadas na implementação do programa fazem parte da proposta de empregar esse modelo de simulação a partir de conceitos relacionados à ciência da computação, engenharia agrícola e educação. A idéia era criar um programa computacio-

nal que pudesse ser utilizado para fins didáticos e que auxiliasse os consultores e demais profissionais da área de armazenamento de grãos de maneira confiável, rápida e eficiente.

No programa computacional SIMH, a massa de grãos é dividida em dez camadas finas, sendo os comportamentos das frentes de temperatura e umidade simulados a cada uma hora, para cada camada.

Os dados de entrada do programa computacional desenvolvido são: a pressão atmosférica (em quiloPascal [kPa]), o tipo de produto (milho, trigo ou soja), o teor de umidade inicial do produto (em porcentagem base úmida [%bu]), a massa específica do produto (em quilo por metro cúbico [ $\text{kg m}^{-3}$ ]), a temperatura de bulbo seco (em graus Celsius [ $^{\circ}\text{C}$ ]) e a umidade relativa do ar ambiente (em porcentagem [%]), a temperatura do ar de secagem ( $^{\circ}\text{C}$ ), a altura da massa de grãos (em metros [m]), o diâmetro do silo (m) e a vazão do ar de secagem (em metros cúbicos por minuto por tonelada [ $\text{m}^3\text{min}^{-1}\text{t}^{-1}$ ]). Inicialmente, considera-se que todas as camadas apresentam temperatura igual à do ar ambiente e teor de umidade igual ao de umidade inicial.

No modelo de Hukill, a variação do teor de umidade do produto depende da altura da camada de grãos e do tempo de secagem. O modelo despreza o calor sensível do produto, admitindo que a temperatura do ar decresça exponencialmente, à medida que passa pela massa de grãos, e que as condições do ar de entrada se mantenham constantes (QUEIROZ; PEREIRA; MELO, 1982). A solução proposta por Hukill utiliza a Equação 1 para determinar o teor de umidade e a Equação 2 para definir a temperatura dos grãos. Essas Equações são aplicadas, de maneira iterativa, no programa computacional SIMH, gerando, ao longo do tempo, perfis das variações do teor de umidade e temperatura dos grãos para cada camada de grãos.

$$U = \frac{2^D(U_i - U_e)}{2^D + 2^Y - 1} + U_e \quad (1)$$

$$T = \frac{2^Y(T_s - T_e)}{2^D + 2^Y - 1} + T_e \quad (2)$$

Em que “U” é o teor de umidade dos grãos em uma dada camada (porcentagem base seca [%bs]), “ $U_i$ ” é o teor de umidade inicial (%bs), “ $U_e$ ” é o teor de umidade de equilíbrio (%bs), “ $D$ ” é um adimensional de profundidade, “ $Y$ ” é um adimensional de tempo, “ $T$ ” é a temperatura dos grãos em uma determinada camada ( $^{\circ}\text{C}$ ), “ $T_s$ ” é a temperatura do ar de secagem ( $^{\circ}\text{C}$ ) e “ $T_e$ ” é a temperatura de equilíbrio ou temperatura do ar na saída da massa de grãos no início da secagem ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Os adimensionais de tempo e de profundidade são obtidos por meio das Equações 3 e 4, respectivamente.

$$Y = \frac{t}{H} \quad (3)$$

$$Y = \frac{AWLV_e c(U_i - U_e)}{60HV_a 0,24(T_s - T_e)} \quad (4)$$

Em que “ $t$ ” é o tempo depois do início da secagem (em horas [h]), “ $H$ ” é o tempo de meia resposta (h), “ $x$ ” é a altura da camada (m), “ $A$ ” é a área do silo (em metros quadrados [ $\text{m}^2$ ]), “ $W$ ” é a massa específica da matéria seca do grão ( $\text{kg m}^{-3}$ ), “ $L$ ” é a entalpia de vaporização da água contida no produto (em quilocalorias por quilo [ $\text{kcal.kg}^{-1}$ ]), “ $V_e$ ” é o volume específico do ar de secagem (em metros cúbicos por quilo [ $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ ]), “ $c$ ” é o calor específico do ar ( $\text{kcal kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e “ $V_a$ ” é a velocidade do ar (em metros cúbicos por minuto [ $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$ ]).

A massa específica da matéria seca é obtida por meio da Equação 5.

$$M = \frac{M_e}{1 + U_i} \quad (5)$$



Em que  $M_e$  é a massa específica do produto ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

O tempo de meia resposta é o período requerido para que uma camada fina de grãos, completamente exposta, alcance uma razão de umidade igual a 0,5 sob determinadas condições de secagem (SILVA; QUEIROZ; SOUSA, 2000). Esse tempo depende das condições do ar de secagem e do produto armazenado. As Equações 6, 7 e 8 foram utilizadas no SIMH para indicar, com precisão, o tempo de meia resposta para o milho, o trigo e a soja, respectivamente.

$$H = \exp(2,413 - 0,016U + T_s - 0,001UT_s) \quad (6)$$

$$H = \left[ \frac{\ln(0,5)}{-0,0178563 \exp(0,0282567T_s)} \right]^{0,612} \quad (7)$$

$$H = \left\{ \frac{\ln(0,5)}{-0,00006194 \exp[0,0208(T_s + 273,15)]} \right\}^{0,5439} \quad (8)$$

Os valores do volume específico e da umidade relativa do ar de secagem foram obtidos por meio de relações psicrométricas, ou seja, pela avaliação das condições do ar (temperatura, umidade relativa, razão de mistura, volume específico, pressão de vapor e outras), utilizando-se equações propostas por Wilhelm (1976) e Zolnier (1994). A altura da camada é considerada como o ponto médio da camada analisada, somado às alturas das camadas anteriores, sendo determinada pela Equação 9.

$$x = E(i - 0,5) \quad (9)$$

Em que “E” é a espessura da camada (m) e “i” é o número da camada (adimensional).

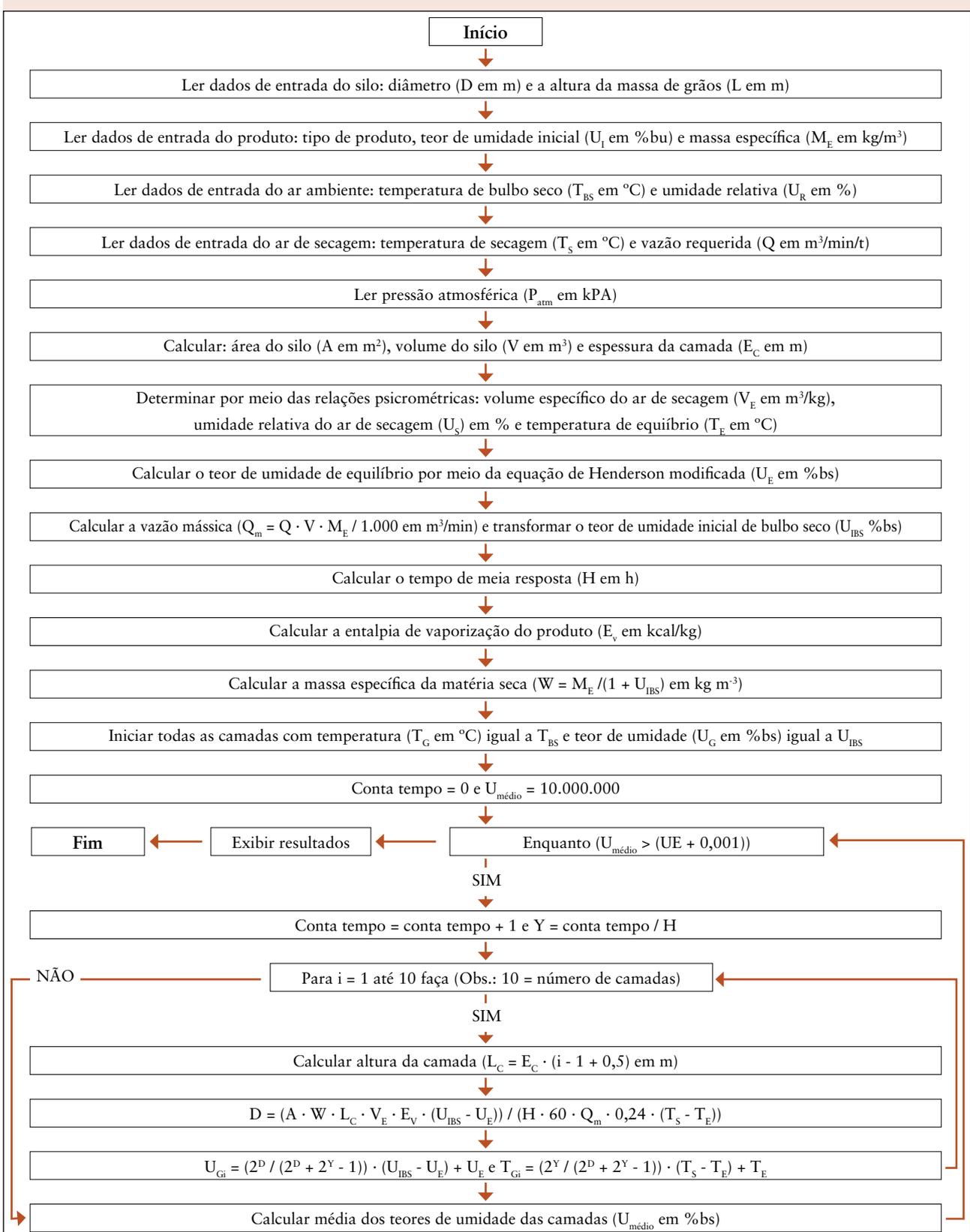
Os outros parâmetros necessários para o estabelecimento do adimensional de profundidade são a velocidade do ar, a entalpia de vaporização da água contida no produto e o teor de umidade de equilíbrio, definidos pelas Equações 10, 11 e 12, respectivamente. Finalmente, a temperatura de equilíbrio é determinada de maneira iterativa, mantendo-se a entalpia do ar constante e variando-se os valores da temperatura e umidade relativa, a partir da temperatura e umidade relativa de secagem, até encontrar uma combinação destas propriedades que forneça um teor de umidade de equilíbrio igual ao teor de umidade inicial.

$$m = \frac{QV}{1000 V_e} \quad (10)$$

$$L = (A_e - 0,57T_s)[1 - B_e \exp(-C_e U_m)] \quad (11)$$

$$U_e = 0,01 \left[ \frac{\ln(1 - U_s)}{-K(T + G)} \right]^{\frac{1}{N}} \quad (12)$$

Em que “Q” é a vazão do ar de secagem ( $\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{t}^{-1}$ ), “V” é o volume do silo (em metros cúbicos [ $\text{m}^3$ ]), “ $A_e$ ” é um parâmetro que varia de acordo com o produto (milho = 606; trigo = 597,6 e soja = 597,6), “ $B_e$ ” é um parâmetro que depende do produto (milho = 4,35; trigo = 1,307 e soja = 0,324), “ $C_e$ ” é um parâmetro que muda conforme o produto (milho = 28,25; trigo = 17,609 e soja = 13,917), “N” é um parâmetro que depende do produto (milho = 1,8634; trigo = 2,2857 e soja = 1,2164), “K” é um parâmetro que depende do produto (milho =  $8,6541 \cdot 10^{-5}$ , trigo =  $2,3007 \cdot 10^{-5}$  e soja =  $3,0527 \cdot 10^{-4}$ ), “G” é um parâmetro que depende do produto (milho = 49,81; trigo = 55,815 e soja = 134,136), “ $U_m$ ” é a média entre o teor de umidade inicial e o teor de umidade de equilíbrio (%bs) e “ $U_s$ ” é a umidade relativa do ar de secagem (decimal).



**Quadro 1: Fluxograma do programa computacional desenvolvido para simular a secagem de grãos em camada estacionária baseada no Modelo de Hukill**

Fonte: Os autores.



A estrutura geral do programa computacional é apresentada no fluxograma exibido no Quadro 1.

### 3 Resultados e discussão

O programa computacional desenvolvido foi executado para várias possibilidades de entrada de dados e os resultados obtidos foram comparados com os de outro modelo de simulação (modelo de Thompson) e com dados reais obtidos em experimento realizado no município de Teixeira (MG) (QUEIROZ; PEREIRA; MELO, 1987; SILVA; QUEIROZ; SOUSA, 2000). A variação dos resultados da simulação é extremamente dependente da entrada de dados. Uma pequena variação num dos parâmetros de entrada pode levar a resultados bastante diferentes. Este comportamento também é observado na prática, pois o processo de secagem com baixas temperaturas depende de muitas variáveis climáticas, além de várias propriedades físicas e psicrométricas do produto e do ambiente de armazenamento. A Tabela 1 apresenta a comparação entre os tempos de secagem obtidos em testes experimentais, aplicando-se um outro modelo de simulação (modelo de Thompson) e empregando-se o modelo de Hukill (implementado no SIMH). Durante todo o período de validação, o SIMH gerou resultados satisfatórios, com diferenças máximas de 24 horas nos tempos de secagem, quando comparados ao trabalho experimental e ao modelo de Thompson. O processo de secagem com baixas temperaturas é bastante lento, com características particulares como a propriedade isolante do grão e as baixas vazões de ar utilizadas nesse tipo de processo agrícola. Portanto, as variações das propriedades do produto armazenado são alteradas muito lentamente. Assim, diferenças máximas de 24 horas no tempo requerido, para que o produto alcance as condições seguras quanto à qualidade dos grãos, são consideradas aceitáveis

quando um sistema de secagem com baixas temperaturas é analisado. Dito de outra maneira, caso o sistema de secagem funcione 24 horas a mais ou a menos, as variações nos resultados obtidos com relação à umidade e à temperatura dos grãos não serão significativas.

**Tabela 1: Comparação entre os tempos de secagem (em horas) obtidos com testes experimentais, com o modelo de Thompson e com o modelo de Hukill implementado no programa computacional SIMH.**

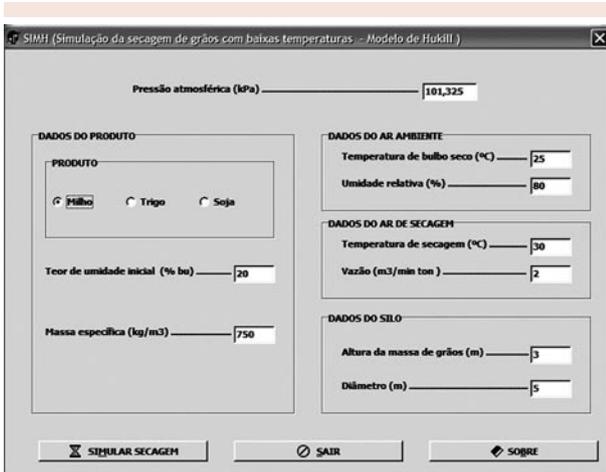
Teor de umidade alcançado (%bu)	Modelo de Hukill (SIMH)	Experimental	Modelo de Thompson
16,7	45	32	43
14,8	70	80	67
13,5	91	116	87
13	125	140	116

Obs.: os dados experimentais foram obtidos em testes de secagem de milho realizados no município de Teixeira (MG). As condições de funcionamento do sistema foram: diâmetro do silo = 2,3 m, altura da camada de grãos = 1,7 m, vazão de ar = 8,8 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>t<sup>-1</sup>, teor de umidade inicial dos grãos = 20%bu, pressão atmosférica = 94 kPa. Utilizaram-se dados meteorológicos coletados pela Estação Meteorológica instalada no *campus* da Universidade Federal de Viçosa, correspondentes aos anos de 1981 e 1982. O aquecimento do ar devido à ação do ventilador variou de 1 a 3°C. Fonte: Os autores; Queiroz, Pereira e Melo (1987); Silva, Queiroz e Souza (2000).

As principais telas geradas pelo programa são apresentadas nas Ilustrações 1, 2, 3 e 4. A nova abordagem de implementação e a interface gráfica mais amigável se mostraram eficientes, atendendo aos objetivos do trabalho. A Ilustração 2 apresenta a tela de entrada de dados do SIMH. É a primeira tela a ser exibida e a partir dela o usuário poderá alterar as condições do processo de secagem de maneira que se adapte à situação que deseja avaliar.

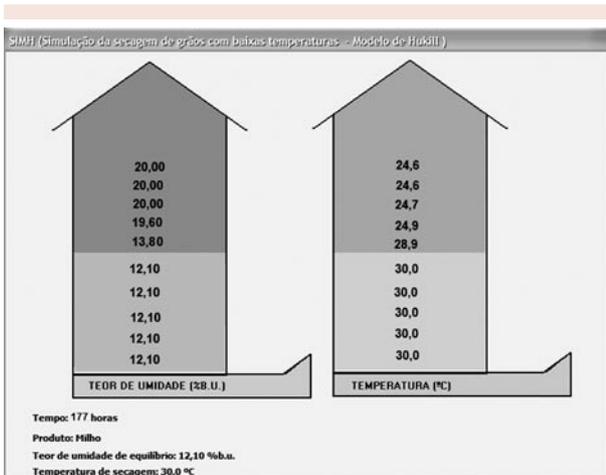
A Ilustração 3 apresenta a tela exibida enquanto a simulação está sendo executada. Os movimentos das frentes de temperatura e umidade são representados por meio de uma animação, que altera as cores das camadas de grãos quando o equilíbrio entre o ar de secagem e o produto é atingido. Essa animação é visualizada nas figuras dos

silos mostradas nessa tela. O valor do tempo de secagem também varia até que o teor de umidade médio da massa de grãos seja igual ao de umidade de equilíbrio, caracterizando o final da secagem.



**Ilustração 1: Tela de entrada de dados do programa SIMH**

Fonte: Os autores.

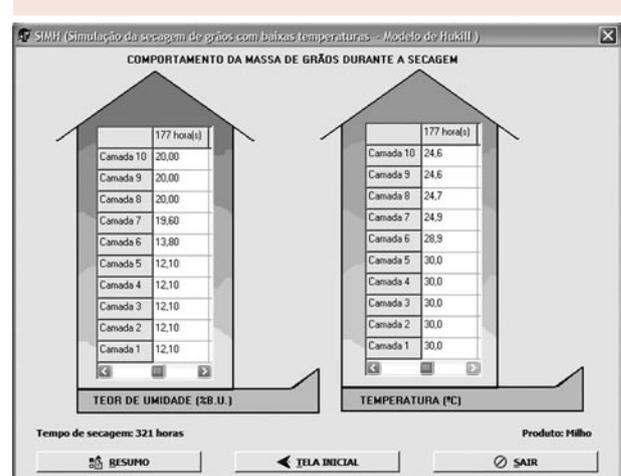


**Ilustração 2: Tela de visualização do processo de simulação do SIMH**

Fonte: Os autores.

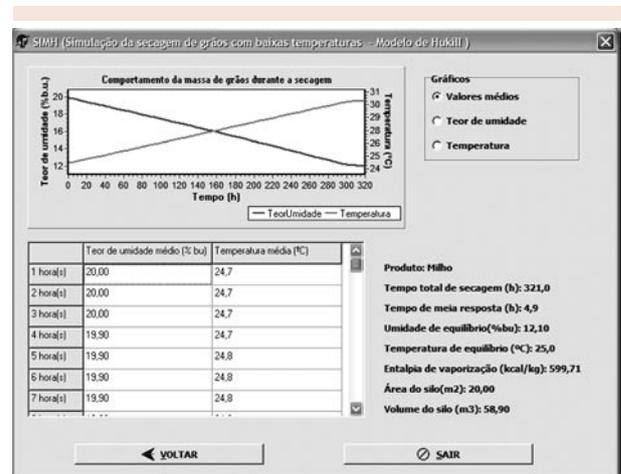
A Ilustração 3 apresenta a tela em que o perfil da secagem é gerado. Esta tela é acessada a partir do botão “Avançar”, exibido na tela de visualização do processo de simulação. Quando se ativa a tela com o perfil da secagem, são exibidas ao usuário duas tabelas referentes ao teor

de umidade dos grãos e à temperatura dos grãos, respectivamente. Em cada tabela, pode-se visualizar, depois do início da secagem, o comportamento de cada camada analisada nos diversos períodos considerados.



**Ilustração 3: Tela do SIMH em que são exibidos os perfis de secagem em função do tempo para cada camada de grãos considerada**

Fonte: Os autores.



**Ilustração 4: Tela do SIMH em que é apresentado um resumo dos principais cálculos efetuados, a média da temperatura e teor de umidade em toda a massa de grãos para cada intervalo de tempo analisado**

Fonte: Os autores.

A Ilustração 4 exibe a tela contendo o resumo dos cálculos efetuados durante o processo de simu-



lação e os valores médios de teor de umidade e temperatura dos grãos nos intervalos de tempo considerados. Os comportamentos do teor de umidade e da temperatura dos grãos, ao longo do processo, também são apresentados de maneira gráfica. Esta tela é ativada a partir do botão “Resumo” da tela com o perfil da secagem.

## 4 Considerações finais

O modelo proposto é capaz de simular, de maneira eficiente, a secagem com baixas temperaturas em camada estacionária para o milho, o trigo e a soja. Os desvios entre os resultados obtidos com o SIMH e os valores experimentais, assim como os desvios entre os resultados alcançados com o SIMH e os valores obtidos em outros trabalhos de simulação, foram aceitáveis para estudos na área de armazenamento, com diferenças de aproximadamente 24 horas no tempo de secagem. Os recursos gráficos, a maneira como os resultados são apresentados e a estrutura do programa se mostraram eficientes e inovadores, tornando o programa computacional SIMH adequado à utilização com fins didáticos para auxiliar consultores e demais profissionais da área de armazenamento de grãos, como engenheiros e técnicos. A utilização desse programa possibilita maior rapidez nas análises, com baixos custos operacionais e resultados confiáveis. A maneira como os dados são lidos, gerados e exibidos no SIMH, além da portabilidade do programa computacional obtida devido à ferramenta de desenvolvimento empregada (plataforma de programação Delphi), torna-o bastante competitivo na comparação com outros programas similares. Essa portabilidade inclui a possibilidade de instalação do programa em computadores com diferentes configurações que utilizem o sistema operacional Windows e

também inclui o pequeno tamanho do arquivo executável (2,3 kbytes).

O programa SIMH pode ser adaptado para realizar simulações de secagem a baixas temperaturas com outros tipos de grãos. Para isso, devem ser acrescentadas à sua estrutura as equações de teor de umidade de equilíbrio, entalpia de vaporização e tempo de meia resposta, característicos de outros produtos agrícolas.

### Grain drying simulation with low temperatures by using Hukill's model: a new approach

This work presents the methodology used in the development of a computational program for the simulation of the fixed bed grain drying with low temperatures, based in the Hukill's Model. The computational program, called SIMH, was written in Object Pascal language using the platform programming Delphi 5. The SIMH's output generates a profile of the drying process in agreement with the conditions supplied by the user. The results simulated by the developed computational program were satisfactory, presenting errors within acceptable ranges for the drying processes considered.

**Key words:** Computational program. Drying. Hukill's model. Simulation.

## Referências

- LAW, A. M.; KELTON, D. W. *Simulation modeling and analysis*. 2. ed. New York. McGraw-Hill, 1991.
- HUKILL, W. V. Grain drying. In: CHRISTENSEN, C. M. *Storage of cereal and their products*. 2. ed. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, 1974. p. 481-508.

NAVARRO, S.; NOYES, R. T. *The mechanics and physics of modern grain aeration management*. 1. ed. New York: CRC Press, 2001.

QUEIROZ, D. M.; PEREIRA, J. A. M.; MELO, E. C. *Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos*. 1. ed. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1982.

\_\_\_\_\_. Determinação de vazões mínimas de ar para secagem de milho em baixas temperaturas na região de Viçosa (MG). *Revista Brasileira de Armazenamento*, Viçosa, v. 11-12, n. 1-2, p. 31-36, 1987.

SILVA, J. S.; QUEIROZ, D. M.; SOUSA, F. F. Estudo da secagem em camada espessa. In: SILVA, J. S. *Secagem e armazenagem de produtos agrícolas*. 1. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000. p. 139-167.

WILHELM, L. R. Numerical calculation of psychrometric properties. *Transaction of the Asae*, St. Joseph, v. 19, n. 2, p. 318-325, 1976.

ZOLNIER, S. Psicrometria I. *Caderno Didático*, Viçosa, n. 13, 1994.

recebido em: 12 set. 2005 / aprovado em: 3 nov. 2005

Para referenciar este texto:

LOPES, D. de C. et al. Simulação da secagem de grãos com baixas temperaturas utilizando-se o modelo de Hukill: uma nova abordagem. *Exacta*, São Paulo, v. 3, p. 85-93, 2005.

