

Simulação de secagem de milho em camada estacionária por meio de modelagem computacional**Corn drying simulation in stationary layer through computational modeling**

DOI:10.34117/bjdv6n8-141

Recebimento dos originais:08/07/2020

Aceitação para publicação:12/08/2020

Wanderson Leandro de Oliveira

Mestre em Engenharia em Gestão de Processos e Sistemas pela Faculdade IETEC - Instituto de Educação Tecnológica

Instituição: Faculdade IETEC - Instituto de Educação Tecnológica

Endereço: Rua Tomé de Souza, 165 -Savassi, Belo Horizonte –MG, Brasil

E-mail: wleandro.oliveira@gmail.com

José Helvecio Martins

Doutor em Engenharia Agrícola pela Purdue University, PURDUE, USA.

Instituição: Faculdade IETEC - Instituto de Educação Tecnológica

Endereço: Rua Tomé de Souza, 165 -Savassi, Belo Horizonte –MG, Brasil

E-mail: j.helvecio.martins@gmail.com

RESUMO

Secagem é um processo frequentemente usado para preservar a qualidade de grãos e de produtos alimentares, quando são armazenados por um longo tempo, em comparação com outros métodos de preservação, pois é um processo mais barato e de fácil operação. O processo de secagem consome uma grande quantidade de energia, por isso é interessante que seja analisado para avaliar as condições para melhorar o processo. Nas atuais condições de mercado altamente competitivo, perguntas sobre a taxa de secagem, custo, qualidade e tecnologia, podem levar a dúvidas sobre a eficiência do processo de secagem. A remoção da água do grão deve ser feita até que seu conteúdo de água atinja um nível tal que o produto esteja em equilíbrio com o ar ambiente onde serão armazenados e deve ser executada de forma a preservar a aparência, qualidade nutricional, no caso de grãos, e a viabilidade, no caso de sementes. No presente trabalho foi desenvolvido um sistema computacional baseado no modelo de secagem em camada fixa desenvolvido na *Michigan State University*. Os resultados simulados foram comparados com dados experimentais obtidos da literatura.

Palavras-chave: Grãos de cereais, Modelo de secagem, Simulação, Camada fixa, MSU.**ABSTRACT**

Drying is a process often used to preserve the quality of grains and food products when they are stored for a long time in comparison to other preservation methods as it is a cheaper process and easy to operate. The drying process consumes a lot of energy, so it is interesting that it is analyzed to evaluate the conditions to improve the process. In today's highly competitive market conditions, questions about the drying rate, cost, quality and technology can lead to doubts about the efficiency of the drying process. The removal of water from the grain must be done until its water content

reaches a level such that the product is in equilibrium with the ambient air where it will be stored and must be performed in order to preserve the appearance, nutritional quality, in the case of grains, and viability, in the case of seeds. In the present work a computational system was developed based on the fixed layer drying model developed at Michigan State University. The simulated results were compared with experimental data obtained from the literature.

Keywords: Cereal grains, Drying model, Simulation, Fixed-bed, MSU.

1 INTRODUÇÃO

A secagem é uma operação unitária importante para preservação dos produtos agrícolas. Em geral, refere-se à remoção da umidade de um material. Essa remoção pode prolongar o prazo de validade dos produtos e reduzir os custos de transporte e armazenamento. Secagem é um dos processos mais importantes nas operações industriais com consumo de energia intenso (RANJABARAN *et al.*, 2014). Como os processos de secagem são grandes consumidores de energia eles devem ser avaliados sob o ponto de vista econômico e da engenharia.

Nas condições de mercados altamente agressivos, questões ligadas à velocidade e custo de secagem, qualidade e tecnologia necessárias exigem definições mais precisas de eficiência de secagem (FORTES e FERREIRA, 2004). Neste aspecto, os gastos com pesquisa e desenvolvimento (P&D) teve um crescimento quase exponencial associado ao processo de secagem de produtos agrícolas numa escala global (MUJUMDAR, 2007).

A necessidade de estocagem de alimentos para utilização em um maior período de tempo é um fator determinante para o desenvolvimento de técnicas que preservem ao máximo a qualidade sensorial e nutricional dos produtos alimentícios mantendo-os seguros para o consumo (Barros *et al.*, 2020).

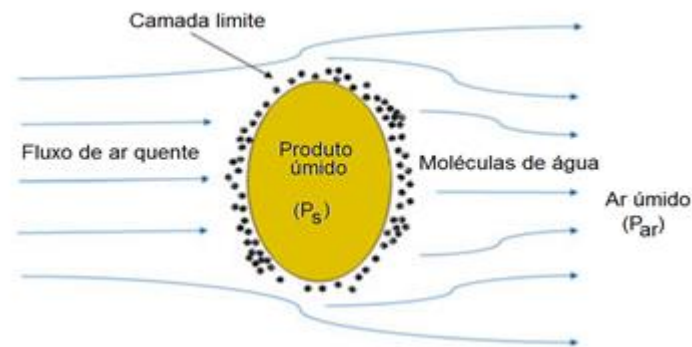
Portanto o objetivo geral deste artigo é abordar o processo secagem e desenvolvimento de um sistema para simulação do processo de secagem em camada espessa estacionária, com o foco na análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo, visando a otimização do processo das condições do processo de secagem.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PROCESSO DE SECAGEM

Secagem é um processo de transferência simultânea de calor e massa. O calor é necessário para evaporar a água removida da superfície do produto que está sendo secado pelo meio externo que promove a secagem, normalmente o ar. Este processo está representado, esquematicamente, na Figura 1.

Figura 1 – Movimentação da água no interior de um produto higroscópico-capilar-poroso durante o processo de secagem.



Fonte: Adaptado de BARBOSA DE LIMA *et al.*, 2016.

A análise do processo de secagem de um único grão é essencial para compreender todos os mecanismos de transporte envolvidos no processo e aplicá-lo à análise da secagem em uma camada fina de grãos, a fim de obter a curva que expressa a taxa de secagem. A secagem de um grão individualmente, ou de uma camada fina de grãos, não causa alterações significativas nas condições do ar em suas vizinhanças. Entretanto, quando uma massa de grãos é colocada dentro de um secador, formando uma camada espessa, as condições psicrométricas do ar que passa através desta camada são modificadas.

Quando o ar aquecido passa através de uma camada espessa de grãos, ele transfere calor sensível para os grãos, que estão mais frios. Portanto, a temperatura do ar diminui e o seu conteúdo de umidade (umidade absoluta ou relativa) aumenta, ao receber a água evaporada do produto, diminuindo, conseqüentemente, seu potencial de secagem.

Um modelo matemático completo que possa simular o processo de secagem de uma camada espessa de grãos deve conter equações que calculem todas as variações de temperatura e umidade, tanto para o produto como para o ar (BROOKER *et al.*, 1992).

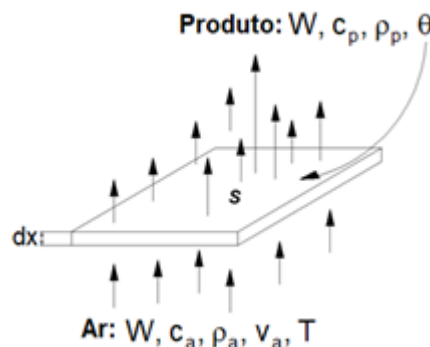
A importância prática da secagem de grãos em camada fina é, por outro lado, é limitada porque, raramente, os grãos são secos em camada fina. Quase sempre, os grãos são secos em camada espessa, estacionária ou em movimento (BROOKER *et al.*, 1992).

A simulação do processo de secagem depende do modelo matemático utilizado e do tipo de secador utilizado para secagem. Na literatura encontram-se alguns modelos matemáticos já testados, como, por exemplo, os modelos de Thompson, de Michigan, de Hukill e de Morey (BROOKER *et al.*, 1992). Cada modelo possui suas particularidades, podendo ser utilizados para realizar simulações que possibilitem a otimização do processo de secagem, bem como a otimização e desenvolvimento de secadores mais eficientes.

O modelo de secagem de grãos em camada estacionária é aplicável à secagem de grãos em silos e à secagem em secadores em camada fixa. Para facilitar a análise, apresenta-se, na Figura 2, um desenho esquemático de uma camada fina de grãos, representando um volume de controle da massa de grãos. As equações que compõem este modelo são apresentadas a seguir.

Os balanços de energia e de massa são escritos para o volume diferencial, $S dx$, localizado em uma posição arbitrária de uma camada fixa de grãos (Figura 2). Existem quatro incógnitas neste modelo: M , teor de água médio do grão; W , razão de umidade do ar (umidade absoluta); T , temperatura do ar; e θ , temperatura do grão. Portanto, são dois balanços de energia e dois balanços de massa que resultam em quatro equações diferenciais parciais acopladas.

Figura 2 - Representação esquemática do volume de controle utilizado no desenvolvimento do modelo de secagem em camada fixa.



Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

A modelagem do processo de secagem é desenvolvida considerando cada tipo de sistema de secagem separadamente. Existem, basicamente, quatro tipos fundamentais de sistema de secagem (secadores): camada fixa, fluxos cruzados, fluxos concorrentes e fluxos contracorrentes.

Os modelos matemáticos de secagem de grãos com base nas leis de transferência de calor e massa levam a sistemas de equações diferenciais bastante complexos, que somente podem ser resolvidos utilizando computadores com alta capacidade de processamento.

Na modelagem do processo de secagem, as seguintes suposições simplificadoras, geralmente, são feitas no desenvolvimento das equações diferenciais que compõem o modelo:

1. A diminuição de volume da camada de grãos é desprezível durante o processo de secagem.
2. Os gradientes de temperatura dentro dos grãos individuais são desprezíveis.
3. A transferência de calor por condução entre os grãos é desprezível.
4. O fluxo de ar e do grão é do tipo pistão e constante.

5. As taxas de variação da temperatura e da umidade absoluta do ar com o tempo, $\frac{\partial T}{\partial t}$ e $\frac{\partial W}{\partial t}$, são desprezíveis em comparação com as taxas de variação da temperatura e da umidade absoluta do ar com a espessura da camada de grãos, $\frac{\partial T}{\partial x}$ e $\frac{\partial W}{\partial x}$, respectivamente.

6. As paredes da câmara de secagem são adiabáticas, com capacidade calorífica desprezível.

7. As capacidades térmicas do ar e do grão são constantes durante curtos períodos de tempo.

8. A equação de secagem de um único grão, ou de uma camada fina grãos, e a equação do teor de água de equilíbrio do produto são disponíveis com precisão adequada.

9. A evaporação da água na superfície dos grãos ocorre à temperatura do ar de secagem.

A primeira hipótese é suspeita porque, durante o processo de secagem, o volume de uma camada de grãos diminui, resultando em uma diminuição da sua espessura. Esta diminuição não é significativa para secadores de fluxo contínuo. O efeito do encolhimento na simulação de secagem em camada estacionária em silos, ajustando o passo de profundidade na integração numérica, tem sido considerado por vários pesquisadores.

As suposições de 2 a 9 são válidas para análises dos diferentes sistemas de secagem de grãos, desde que estejam disponíveis equações precisas de secagem em camada fina e do teor de água de equilíbrio para o grão (BROOKER *et al.*, 1992). Neste artigo, foi analisado somente o sistema de secagem em camada estacionária, desenvolvido na Universidade Estadual de Michigan, denominado de modelo MSU (*Michigan State University*).

A modelagem do processo de secagem em camada espessa consiste, fundamentalmente, em dividir a massa de grãos em várias camadas finas imaginárias e resolver o modelo matemático para cada camada, sucessivamente, até completar a análise para todas as camadas.

A análise é realizada, repetidamente, para cada incremento de tempo, até que o processo de secagem seja finalizado. Este processo está ilustrado, esquematicamente, na Figura 3 e a sequência de procedimentos necessários para simulação do processo de secagem de grãos em camada espessa estacionária é apresentada a seguir.

1. Dividir a massa de grãos em várias camadas finas.

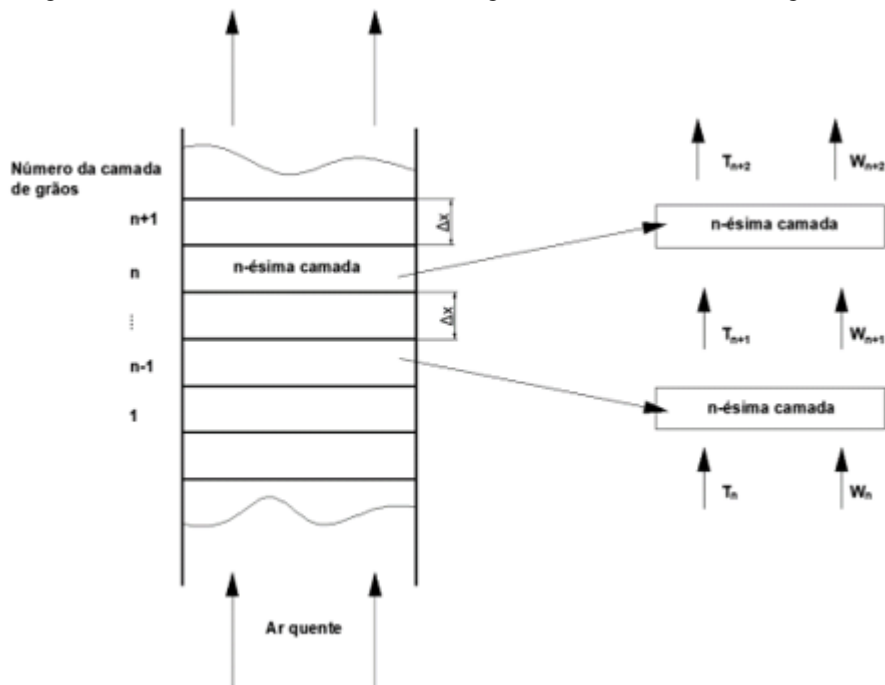
2. Dividir o tempo de secagem em incrementos de tempo pequenos.

3. O teor de água inicial dos grãos, a temperatura e a razão de umidade do ar, antes de o ar quente entrar na primeira camada fina são conhecidos. Determina-se, então, o teor de água do grão na primeira camada depois de um incremento de tempo Δt .

4. A razão de umidade do ar quente na saída da camada fina é obtida por meio equações de equilíbrio de massa.

5. A temperatura do grão, θ , e a temperatura do ar, T , na saída da camada fina são obtidas pelas equações de equilíbrio térmico depois de cada incremento de tempo.
6. Para obter o teor de água e a temperatura do grão da segunda camada fina, e os parâmetros de entrada do ar quente na terceira camada de pois de um incremento de tempo, os parâmetros do ar quente na saída da primeira camada são considerados como condições de entrada na segunda camada. Então, os procedimentos de 3 ao 5 são repetidos e o processo continua sendo executado em todas as camadas finas.
7. O tempo é incrementado e então os passos de 1 a 6 são repetidos até que o processo de secagem termine.

Figura 3 - Processo de divisão da massa de grãos em camadas finas imaginárias.



Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

2.2 MODELAGEM DO PROCESSO DE SECAGEM EM CAMADA ESPESSE

Os modelos de secagem MSU caracterizam-se por serem descritos por equações diferenciais parciais e possuem vários parâmetros relativos ao produto e ao ar de secagem, permitindo análises de sensibilidade desses parâmetros (BROOKER *et al.*, 1992).

2.3 DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE SECAGEM

Para solução das equações do modelo de secagem MSU, foi utilizado o método de diferenças finitas progressivas tanto no espaço quanto no tempo para discretizar as quatro equações diferenciais do modelo. A discretização descrita a seguir foi baseada em Liu *et al.* (2015), tendo como equação

de camada fina a equação de Page. Neste trabalho, para discretização das equações diferenciais parciais não foi considerada as diferenças finitas retroativas no espaço, para a temperatura do grão e do ar de secagem, conforme realizado por Liu *et al.* (2015).

2.4 BALANÇO DE ENERGIA PARA O AR

A quantidade de energia transferida por convecção é igual à diferença entre a entalpia do ar que entra no volume de controle, $S dx$, e a entalpia que sai dele, mais a variação da entalpia do ar em relação ao tempo nos espaços vazios da camada de grãos. De acordo com a suposição 5, a variação no tempo é desprezível (BROOKER *et al.*, 1992). Portanto, a expressão que descreve a variação da entalpia do ar é simplificada e pode ser escrita conforme a Equação 1.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-ha(T-\theta)}{G_a(c_a + c_v W)} \quad (1)$$

$$T_j^n = T_{j-1}^n + \left[\frac{-ha(T_j^n - \theta_j^n)}{G_a c_a + G_a c_v W_j^n} \right] \Delta x \quad (2)$$

2.5 BALANÇO DE ENERGIA PARA PRODUTO

A quantidade de energia transferida por convecção do ar para os grãos na camada é igual à soma das entalpias necessárias para o aquecimento dos grãos, para evaporação da água da superfície dos grãos, e para aquecer o vapor resultante deste processo. Em qualquer instante, a variação de entalpia dos grãos no volume é descrita em função da taxa de variação da temperatura dos grãos, conforme Equação 4.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{-ha}{\rho_p(c_p + c_v M)} (T - \theta) + \frac{h_{fg} + c_v(T - \theta)}{\rho_p(c_p + c_v M)} G_a \frac{\partial W}{\partial x} \quad (3)$$

$$\theta_j^n = \theta_{j-1}^n + \left[\frac{h_a(T_j^n - \theta_j^n)}{\rho_p c_p + \rho_p c_w M_j^n} - \frac{h_{fg} + c_v(T_j^n - \theta_j^n)}{\rho_p c_p + \rho_p c_w M_j^n} G_a \frac{W_j^n - W_{j-1}^n}{\Delta x} \right] \Delta t \quad (4)$$

2.6 BALANÇO DE MASSA PARA O AR

A quantidade de vapor de água transportado pelo ar para fora do volume de controle, menos a quantidade transportada para dentro do volume é igual à taxa de variação da umidade do ar nos espaços vazios. Esta quantidade é igual à quantidade de água perdida pelos grãos no volume de controle, devido ao processo de secagem. Considerando a simplificação de acordo com a suposição 5, obtém-se a taxa de variação da umidade do ar, conforme Equação 5.

$$\frac{\partial W}{\partial x} = - \left(\frac{\rho_p}{G_a} \right) \frac{\partial M}{\partial t} \quad (5)$$

$$W_j^n = W_{j-1}^n - \left[\frac{\rho_p}{G_a} \left(\frac{M_j^n - M_{j-1}^n}{\Delta t} \right) \right] \Delta x \quad (6)$$

2.7 BALANÇO MASSA PARA O PRODUTO

A taxa de variação no teor de água de um grão (ou de uma camada fina de grãos) é expressa por uma equação de secagem apropriada para o produto que está sendo secado. De acordo com as discussões apresentadas nas seções anteriores, as equações empíricas fornecem resultados melhores, quando adequadamente ajustadas para as faixas de condições de secagem consideradas. Neste trabalho foi utilizada a equação de Page como equação de camada fina, apresentada a seguir (equação 7) e reescrita a seguir, na forma diferencial.

Equação de Page em 1949 (BROOKER *et al.*, 1992), como uma modificação da lei de resfriamento de Newton, conforme descrita pela Equação 7.

$$M_r = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-k t^b) \quad (7)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = (-k \cdot b \cdot t^{b-1}) \left[\exp(-k \cdot b \cdot t^b) (M_0 - M_e) \right] \quad (8)$$

$$M_j^n = M_{j-1}^n + \left\{ (-k \cdot b \cdot t^{b-1}) \left[\exp(-k \cdot b \cdot t^b) (M_j^n - M_e^n) \right] \right\} \Delta t \quad (9)$$

2.8 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para resolver numericamente qualquer um dos modelos de secagem de grãos, as condições iniciais e de contorno do grão e do ar tem que ser especificadas. As condições de contorno para o modelo de secagem em camada estacionária são definidas pelas seguintes expressões:

$$T(0,t) = T_0; \quad \text{Temperatura do ar na entrada (em } x = 0 \text{)}. \quad (10a)$$

$$\theta(x,0) = \theta_0; \quad \text{Temperatura inicial do grão (em } t = 0 \text{)}. \quad (10b)$$

$$W(0,t) = W_0; \quad \text{Razão de umidade do ar na entrada (em } x = 0 \text{)}. \quad (10c)$$

$$M(x,0) = M_0; \quad \text{Teor de água inicial do grão (em } t = 0 \text{)}. \quad (10d)$$

2.9 EQUAÇÕES PARA O CÁLCULO DO TEOR DE ÁGUA DE EQUILÍBRIO

O conceito de teor de água de equilíbrio é fundamental para a análise do processo de secagem de grãos. O teor de água de equilíbrio determina o teor de água mínimo que um determinado grão pode atingir, quando estiver sendo secado sob determinadas condições de secagem. O teor de água de equilíbrio é dependente da umidade relativa e da temperatura do ambiente onde ocorre o processo, bem como da espécie, variedade e estado de maturação do produto (BROOKER *et al.*, 1992).

Vários modelos para o cálculo do teor de água de equilíbrio podem ser encontrados na literatura para os mais diversos tipos de grãos (exemplos: Thompson, 1967; Chung e Pfost, 1967; Pfost *et al.*, 1976; Silva, 1978), com precisão satisfatória (BROOKER *et al.*, 1992).

A equação de Henderson, modificada com a introdução de mais um coeficiente, tem sido ajustada a dados experimentais de teor de equilíbrio para milho e outros grãos. Portanto, seus coeficientes têm sido periodicamente modificados de acordo com a necessidade das pesquisas. Para grãos de milho, a Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas (*American Society of Agricultural Engineers – ASAE*) tem recomendado a utilização da equação de Henderson modificada, conforme a Equação 12 (ASAE, 1988).

$$M_e = \left(\frac{1}{100} \right) \left[- \frac{\ln(1-\varphi)}{c_1(T+c_3)} \right]^{1/c_2} \quad (12)$$

em que:

M_e = Teor de água de equilíbrio, base seca, decimal;

φ = Umidade relativa do ar, decimal;

T = Temperatura do ar, °C;

c_1 = Coeficiente empírico ($c_1 = 8,6541 \cdot 10^{-5}$);

c_2 = Coeficiente empírico ($c_2 = 1,8634$);

c_3 = Coeficiente empírico ($c_3 = 49,810$).

Neste trabalho, foi usada a equação de Page ajustada para milho, variedade Jacques JX-52 (LI; MOREY, 1984), assumindo sua validade para a predição da taxa de secagem de milho híbrido, variedade FRB73×MO17, safra de 1987 (MARTINS, 1988), como base para validação do modelo computacional proposto.

As constantes de secagem, k , e o parâmetro empírico, b , da equação de Page usada neste trabalho foram estimados usando as Equações 13 e 14, respectivamente.

$$k = 1,091 \times 10^{-2} + 2,767 \times 10^{-6} T^2 + 7,286 \times 10^{-6} T M_0 \quad (13)$$

$$b = 0,5375 + 1,141 \times 10^{-5} M_0^2 + 5,183 \times 10^{-5} T^2 \quad (14)$$

Os modelos de simulação que descrevem o processo de secagem em secadores de camada estacionária, de fluxos cruzados, de fluxos concorrentes e de fluxos contracorrentes consistem, todos, de quatro equações diferenciais com quatro incógnitas (BROOKER *et al.*, 1992), formando sistemas de equações diferenciais parciais acopladas.

Cada sistema de equações deve ser resolvido, simultaneamente, usando alguma técnica robusta de integração, geralmente, por meio de métodos numéricos, haja vista que soluções analíticas são de difíceis implementação, além de não proporcionar melhoria nos resultados e nem aumento significativo da eficiência computacional.

Uma expressão que forneça resultados suficientemente precisos, para determinar as curvas de isotermas do teor de água de equilíbrio para o tipo de grão particular que está sendo secado, é fundamental. Também é necessário calcular a razão de umidade (umidade absoluta) do ar de secagem e verificar a possibilidade de ocorrência de condensação de vapor de água sobre a massa de grãos, dentre outras condições.

Os três modelos para (1) o processo de secagem, (2) o teor de água de equilíbrio dos grãos, (3) e as relações entre o vapor de água e o ar seco são combinados para formar o modelo de simulação de um dos sistemas de secagem mencionados. Além disso, os valores de propriedades físicas do ar, dos grãos e da água precisam ser conhecidos.

O valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, h , deve ser conhecido nas interfaces das camadas de grãos. Caso esta expressão para calcular este coeficiente não esteja disponível, um valor médio pode ser usado. Todavia, uma expressão matemática que pode ser usada para calcular o coeficiente de transferência de calor por convecção, h , nas interfaces das camadas de grãos, foi encontrada na literatura (BARKER, 1965), definida pelas Equações 15 e 16, e usada neste trabalho.

$$h = a \cdot c_a \cdot G_a \left(\frac{2r_0 \cdot G_a}{\mu_a} \right)^b \quad (15)$$

$$\mu_a = \alpha + \beta \cdot T \quad (16)$$

Valores dos coeficientes a , b , α , β podem ser encontrados na literatura, conforme dados a seguir (BARKER, 1965), para as Equações 15 e 16 no Sistema Internacional de Unidades (SI).

$$a = 0,2755; \quad b = -0,34; \quad \alpha = 0,06175; \quad \beta = 0,000165$$

Para a solução numérica dos modelos de secagem em camada espessa, a camada de grãos é dividida em várias camadas finas (de 3 a 5 cm de espessura), e as equações do modelo são resolvidas simultaneamente para cada camada. Portanto, a temperatura e o teor de água dos grãos podem ser considerados uniformes em toda a camada e as propriedades físicas do ar e do produto podem ser assumidas constantes durante um curto período de tempo.

As principais fontes de erro entre os valores simulados e os dados reais são: (1) falta de precisão das equações de secagem de grãos em camada fina; (2) precisão insuficiente das equações das isotermas de equilíbrio higroscópico dos grãos para umidade relativa do ar acima de 90%; e (3) erros na medição dos parâmetros de entrada e do desempenho real dos secadores de grãos.

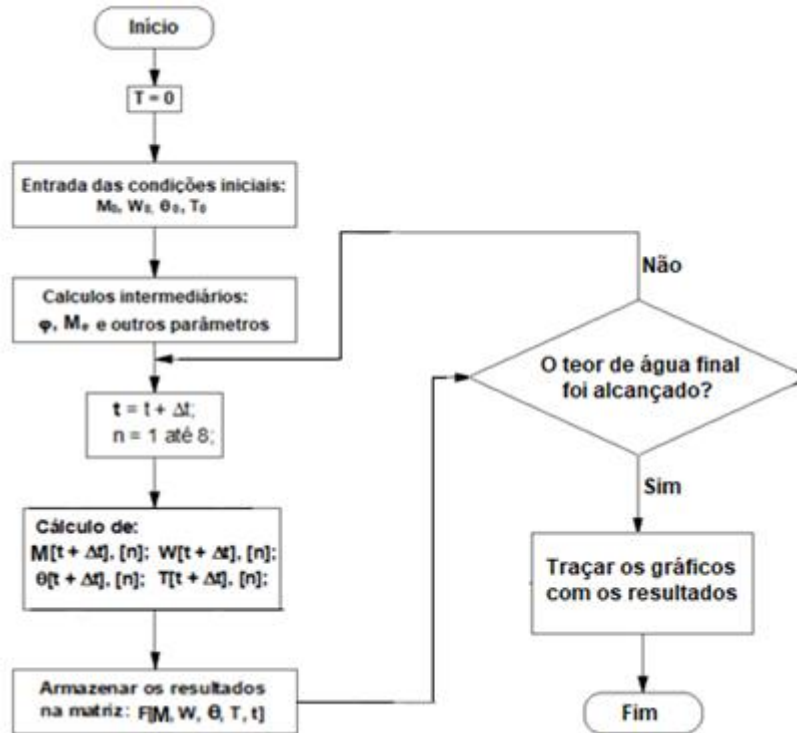
Embora a exata predição do desempenho de secador de grãos possa ser impossível, estudos comparativos de desempenho de diferentes tipos de secadores podem ser realizados e validados dentro de uma faixa de desvio aceitável. Este tipo de estudo pode ser realizado por meio de testes de simulação, o que demonstra a importância da simulação em projetos de secadores de grãos

As Equações 1, 3, 5 e 8 constituem o modelo de secagem em camada espessa estacionária de grãos. Uma solução analítica deste sistema de equações apresenta várias dificuldades, além de não fornecer resultados satisfatórios na maioria das vezes. Portanto, torna-se necessária a utilização de técnicas de solução usando métodos numéricos, que fornecem resultados satisfatórios e são computacionalmente mais eficientes.

2.10 SOLUÇÃO DO MODELO DE SECAGEM MSU EM CAMADA ESTACIONÁRIA

Os procedimentos de programação seguiram a lógica esquematizada na Figura 3, a sequência apresentada no fluxograma básico mostrado na Figura 4, e as facilidades contidas na linguagem de programação do MATLAB. Para testar o programa desenvolvido, foram utilizados dados experimentais e/ou estimados encontrados na literatura (MARTINS, 1988; BROOKER *et al.*, 1992).

Figura 4 - Fluxograma do programa computacional desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

As equações que compõem o modelo foram discretizadas (Equações 2, 4, 6 e 9) usando diferenças finitas progressivas no espaço e no tempo. A implementação da solução do modelo de secagem, em camada espessa estacionária, foi realizada usando um programa computacional desenvolvido especialmente para solucionar este problema. O programa foi escrito e implementado na plataforma de programação do MATLAB (versão Educacional), que foi escolhido devido à sua flexibilidade de programação e robustez na solução de problemas complexos.

2.11 VALIDAÇÃO DO MODELO DE SECAGEM MSU EM CAMADA ESTACIONÁRIA

A validação do modelo computacional desenvolvido foi realizada por meio de testes de simulação usando dados obtidos na literatura, que foram usados como referência, e comparando os resultados usando testes de correspondência e estimativas de desvios.

Para validação do modelo foi utilizada a equação de secagem em camada fina apresentada por Page em 1949, combinada com a equação de isotermas de equilíbrio higroscópico, proposta por Henderson em 1952, modificada, ambas com seus parâmetros ajustados para grãos de milho, e dados experimentais de secagem em camada fina de milho híbrido, variedade FBR73 × MO17, safra de 1986, obtidos na literatura (MARTINS, 1988).

Tabela 1 – Condições utilizadas nos testes experimentais de secagem em camada fina de milho híbrido, variedade FBR73 × MO17, safra de 1986, para obtenção da curva de secagem.

T_{ar} (°C)	Φ_{ar} (%)	V_{ar} (m/s)	M_0 (b.s.)		
37,8	33,34	----- 0,26 ----- 0,54	0,363	0,324	0,291
65,6	8,51	----- 0,26 ----- 0,54	0,363	0,324	0,291
93,3	2,75	----- 0,26 ----- 0,54	0,363	0,324	0,291
118,3	1,16	----- 0,26 ----- 0,54	0,363	0,324	0,291

Fonte: Adaptado de MARTINS, 1988.

Curvas de secagem foram simuladas, utilizando as mesmas condições de secagem usadas por Martins (1988), apresentadas na Tabela 1, para testar a adequabilidade das equações escolhidas, as quais são essenciais para a modelagem do processo de secagem em camada espessa, cujos resultados são apresentados adiante.

3 METODOLOGIA

Este sistema foi implementado utilizando a linguagem de programação MATLAB, devido à sua capacidade de oferecer vários recursos matemáticos para desenvolver sistemas de simulação como, por exemplo, métodos matemáticos nativos, o que reduz, significativamente, o tempo de programação.

Neste trabalho, optou-se por desenvolver um código de programa sem utilizar métodos matemáticos nativos do software MATLAB, para deixar a codificação explícita e flexível, para que ela possa ser facilmente modificada e reprogramada por outrem, de acordo com as necessidades específicas. Isto irá permitir que a equação de secagem em da camada fina, parâmetros e/ou propriedades físicas do produto, dentre outros, possam ser substituídos, sem a necessidade de alterar significativamente o código do programa.

O sistema computacional foi estruturado em duas partes: (i) uma função principal e (ii) funções complementares, codificadas para serem invocadas pela função principal. No início da execução do sistema, é necessário informar os parâmetros de entrada contendo as condições iniciais do ar e dos grãos: (i) a temperatura e a umidade absoluta do ar de secagem e (ii) o teor de água inicial e a temperatura inicial dos grãos.

A flexibilidade do programa permite modificar os parâmetros e/ou as propriedades físicas do produto e as condições de secagem, dentre outras, permitindo a realização de estudos de cenários com facilidade.

Depois da inserção das condições iniciais, existe um laço (*loop*) que avança no tempo e no espaço. Inicialmente ocorre um incremento no tempo t , que passa para $t + \Delta t$. Dentro deste *loop*, são efetuadas a solução das quatro equações diferenciais do modelo de secagem, na sequência descrita a seguir.

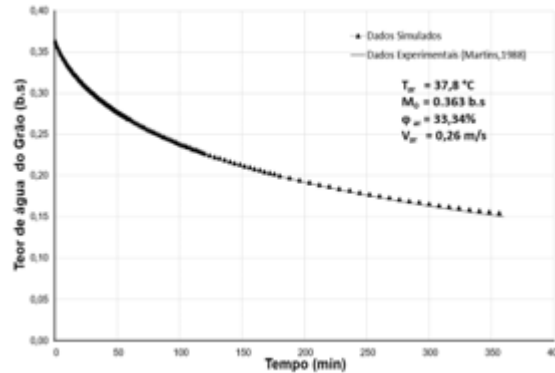
1. Cálculo da umidade relativa do ar e do teor de água de equilíbrio do grão, por meio de funções que são chamadas de dentro da malha de retorno (*loop*).
2. Cálculo da taxa de secagem do grão, $\frac{\partial M}{\partial t}$.
3. Cálculo da taxa de variação da umidade absoluta do ar em relação à posição na camada de grãos, $\frac{\partial W}{\partial x}$.
4. Cálculo da taxa de variação da temperatura dos grãos, $\frac{\partial \theta}{\partial t}$.
5. Cálculo da taxa de variação da temperatura do ar em relação à posição na camada de grãos, $\frac{\partial T}{\partial x}$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos testes de simulação e validação são apresentados nas seções seguintes.

Estes cálculos são realizados para a primeira camada (entrada do secador), onde ocorre um avanço no espaço, que passa de x para $x + \Delta x$, configurando o avanço no espaço, até atingir a última camada. Então, incrementa-se o tempo em Δt e repete-se esta sequência, até atingir o teor médio de água final especificado para a massa de grãos, quando termina o processo de secagem. Em seguida, o programa traça os gráficos dos resultados, automaticamente.

As curvas de secagem, simulada e experimental, para temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem iguais a 37,8°C, 33,34% e 0,26 m/s, respectivamente, e teor de água inicial do grão igual a 0,363 b.s., são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 - Curvas de secagem, simulada e experimental ($T=37,8^{\circ}\text{C}$ e $V=0,26\text{m/s}$)

Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

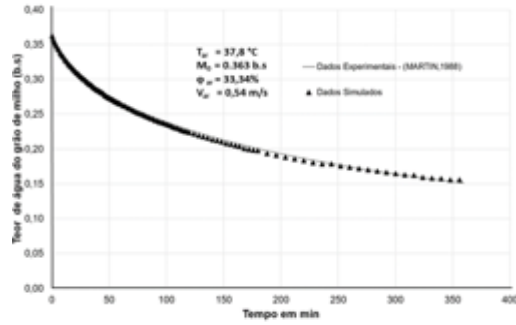
Observa-se, claramente, na Figura 5, que parece não haver diferenças significativas entre os dados simulados e os dados experimentais, para as condições em que foi realizada os testes de secagem.

Seguindo os mesmos procedimentos, resultados similares foram obtidos para as outras condições de secagem apresentadas na Tabela 1, mantendo o teor de água inicial dos grãos igual $0,363 \text{ b.s}$. Estes resultados são apresentados, graficamente, nas Figuras 6 a 12.

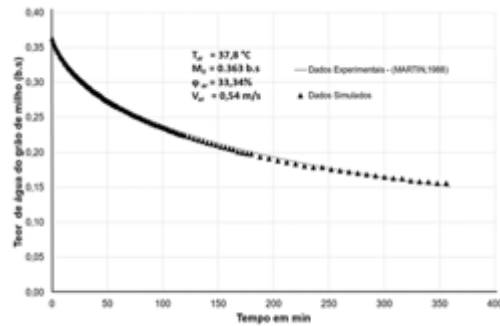
Observações semelhantes podem ser feitas e as conclusões possíveis são similares. Portanto, o modelo escolhido pode ser utilizado com confiabilidade para compor o modelo de secagem em camada espessa estacionária.

Deve ser ressaltado, todavia, que, à medida em que se eleva a temperatura de secagem, observa-se o aparecimento de alguma dispersão nos dados experimentais e pequena discrepância entre os resultados simulados e os experimentais, embora estas diferenças encontrem-se na faixa de erro aceitável para o processo de secagem.

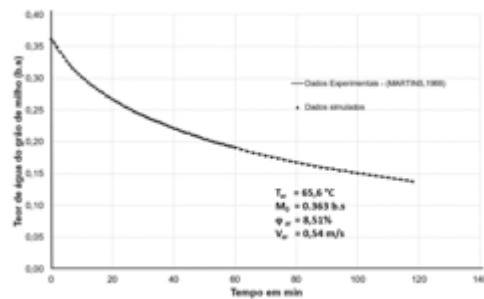
Existem várias possíveis explicações para essas discrepâncias, uma delas pode ser maior erro introduzido nas medições quando as temperaturas do ar de secagem são mais elevadas, devido ao sistema de aquisição de dados utilizado não ser completamente automatizado e, conseqüentemente, as dificuldades do operador para realizar as medições serem maiores (MARTINS, 1988).

Figura 6 – Curvas de secagem, simulada e experimental ($T=37,8^{\circ}\text{C}$ e $V=0,54\text{m/s}$)

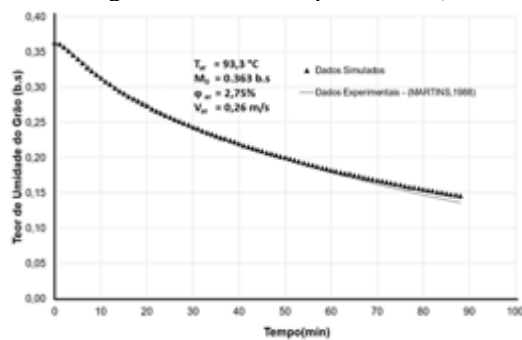
Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

Figura 7 - Curvas de secagem, simulada e experimental ($T = 65,6^{\circ}\text{C}$ e $V=0,26\text{m/s}$)

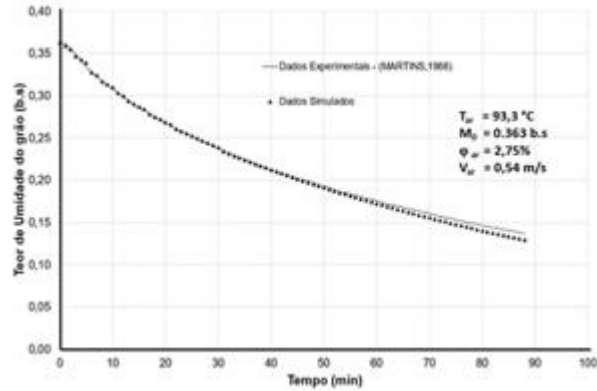
Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

Figura 8 - Curvas de secagem, simulada e experimental ($T=65,6^{\circ}\text{C}$ e $V=0,54\text{m/s}$)

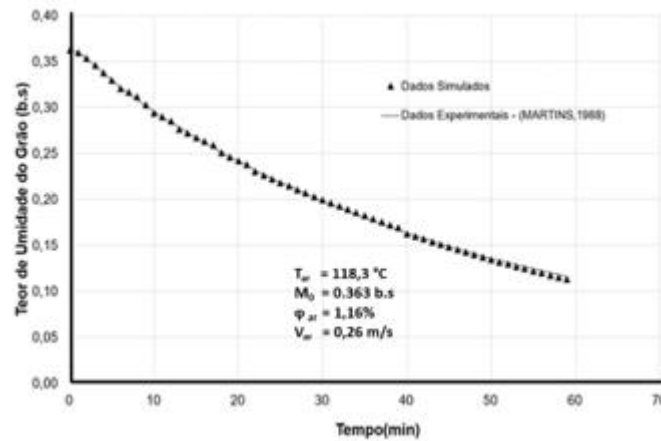
Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017

Figura 9 - Curvas de secagem, simulada e experimental ($T=93,3^{\circ}\text{C}$ e $V=0,26\text{m/s}$)

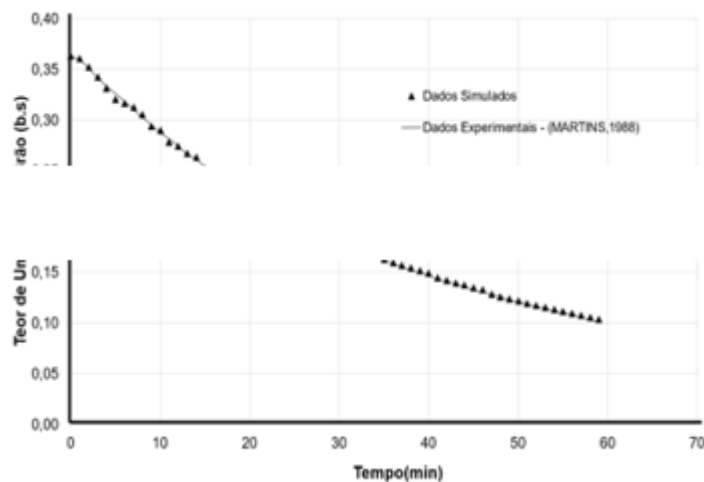
Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

Figura 10 - Curvas de secagem, simulada e experimental ($T=93,3^{\circ}\text{C}$ e $V=0,26\text{m/s}$)

Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

Figura 11 - Curvas de secagem, simulada e experimental ($T=118,3^{\circ}\text{C}$ e $V=0,26\text{m/s}$)

Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

Figura 12 - Curvas de secagem, simulada e experimental ($T=118,3^{\circ}\text{C}$ e $V=0,54\text{m/s}$)

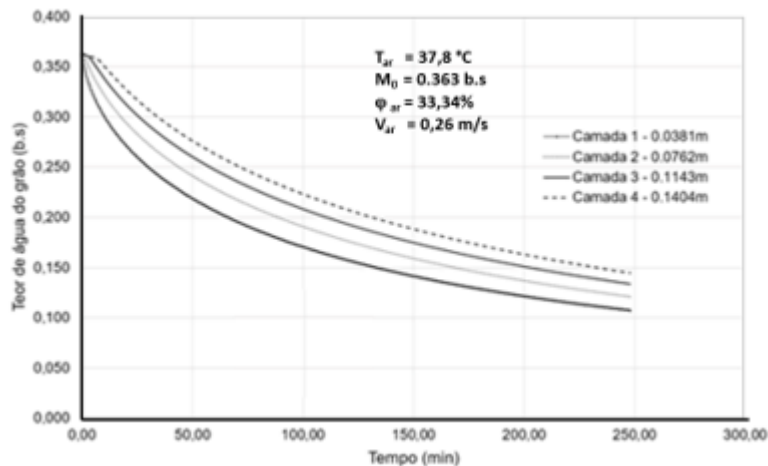
Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

Depois da realização das simulações de secagem em camada fina e comprovação da validade do modelo utilizado na composição do modelo de secagem em camada espessa, foram realizadas algumas simulações utilizando temperatura do ar de secagem de 37,8°C, velocidade do fluxo de ar de 0,26 m/s, em uma camada fixa de grãos com espessura de 30,5 cm, aproximadamente, dividida em 8 camadas finas com 3,81 cm de espessura cada.

Nos testes de simulação em camada espessa, foi considerado apenas o teor de água inicial dos grãos de 0,363 b.s., para confirmação do grau de exatidão do modelo de secagem em camada espessa estacionária (modelo MSU) e a confiabilidade do programa computacional desenvolvido.

Os resultados da simulação da secagem para cada camada, nas condições especificadas, são apresentados na Figura 13, para facilitar a visibilidade dos resultados foram apresentados os resultados apenas das 4 camadas iniciais

Figura 13 – Curvas de secagem simuladas, para temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem.



Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

Observa-se, na Figura 13, que a taxa de secagem, em geral, torna-se menor e decrescente com o tempo. Este resultado era esperado, em função das características do processo de secagem, comprovadas pela análise das equações de secagem em camada fina.

Na secagem em camada fixa estacionária, o ar de secagem entra na camada de grãos com uma temperatura especificada e sai da camada com uma temperatura menor, devido à troca de calor com os grãos, os quais experimentam um aumento em sua temperatura. Portanto, o potencial de secagem do ar diminui à medida em que passa através da camada de grãos e decresce com o tempo.

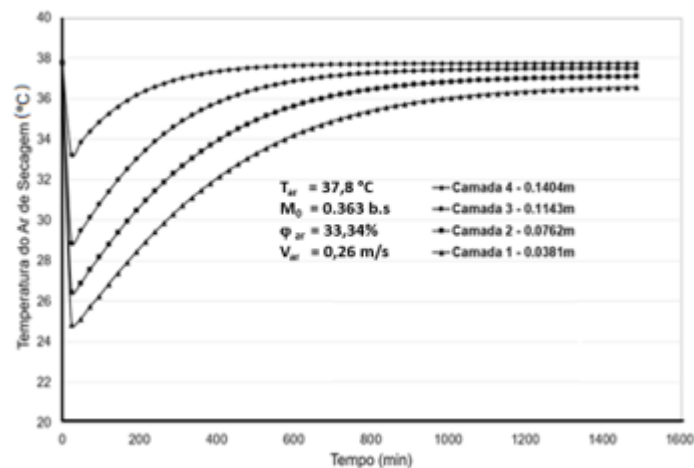
Quando cessa um processo de secagem, existe um gradiente de teor de água na massa de produto. Para efeitos práticos, a massa de produto é retirada do secador e passa por um processo de revolvimento e deixada em repouso durante um tempo suficiente para uniformização do teor de

água. O valor do teor de água depois de uniformizado é o teor de água médio da massa de produto. Para milho, este valor deve ser em torno de 13% b.u. (ou 15% b.s.).

Durante o processo de secagem, ocorre a transferência de calor e massa entre o ar e o produto que está sendo secado. A transferência de calor ocorre do ar quente para o produto mais frio e úmido. Então, ocorre a transferência de massa (vapor de água) do produto para o ar, que a transporta para fora do sistema. Obviamente, a temperatura do ar diminui e a do produto (milho neste caso) aumenta, tendendo a um equilíbrio térmico ao longo do tempo.

As curvas de variação da temperatura do ar, ao longo da camada espessa de grãos de milho, encontram-se na Figura 14. Observa-se que ocorre, inicialmente, uma queda na sua temperatura do ar de secagem. Depois de certo período de tempo (não muito longo), o ar começa a se reaquecer, porque a temperatura do ar na entrada da primeira camada no secador é mantida constante, e a movimentação do fluxo de ar quente através da massa de grãos impulsiona o processo de secagem.

Figura 14 – Variação da temperatura do ar ao longo da camada de grãos.



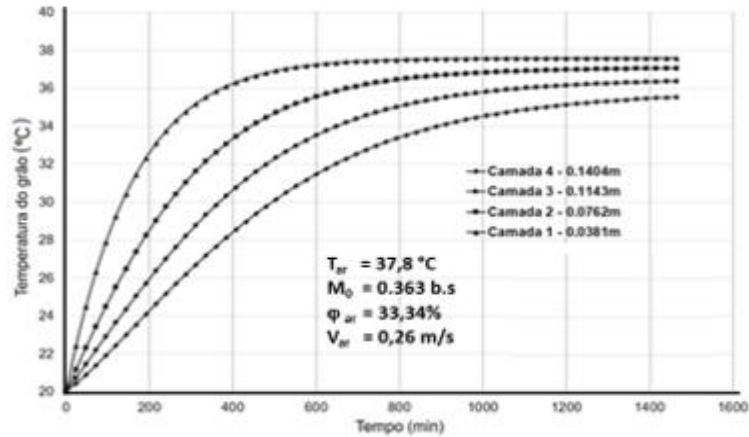
Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

Na simulação do processo de secagem, assumiu-se que a temperatura da massa de grãos, inicialmente, era uniforme e igual a 20°C. Durante o processo de secagem, obviamente, ocorre o aquecimento dos grãos, o que causa aumento na sua temperatura, conforme pode ser observado na Figura 15.

Observa-se que a temperatura da massa de grãos durante a secagem aumenta e tende a entrar em equilíbrio com a temperatura do ar de secagem depois de um tempo suficientemente longo. No final do processo de secagem, a temperatura da massa de grãos é, praticamente, igual à temperatura do ar de secagem, ao longo de toda a camada de grãos. Conclui-se, portanto, que o fenômeno de resfriamento do ar e aquecimento dos grãos ocorrem simultaneamente, o que

confirma a teoria de transferência simultânea de calor e massa durante o processo de secagem, conforme apresentado nas Figuras 15 e 16.

Figura 15 – Variação da temperatura do produto, em um instante t.



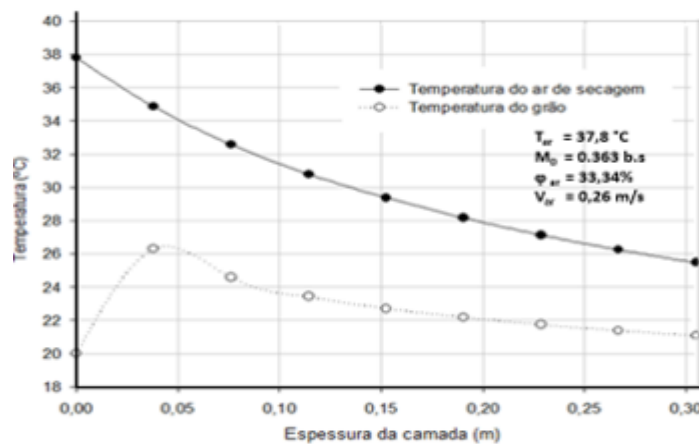
Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

O fenômeno de transferência simultânea de calor e massa pode ser, claramente, observado na Figura 16, analisando as variações na temperatura do ar e dos grãos, durante o processo de secagem.

Outro aspecto importante é a possibilidade de condensação da água evaporada dos grãos, principalmente nas camadas mais distantes do ponto de entrada do fluxo de ar de secagem, porque o ar pode atingir o estado de saturação antes de atravessar toda a camada de grãos.

Neste trabalho, não foi realizado o cálculo da quantidade de água condensada durante o processo de secagem, mas foi observado a possibilidade de condensação, de acordo com a temperatura e a velocidade do ar de secagem.

Figura 16 – Variação da temperatura do ar e dos grãos durante o processo de secagem



Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

A variação da umidade relativa do ar intergranular, ao longo da massa de grãos, é apresentada na Tabela 2, para as condições de secagem especificadas. Observa-se que, nos primeiros instantes da secagem, a umidade relativa do ar intergranular atinge o valor de 99%. Na realidade, o valor atingido foi superior a 99%, indicando saturação do ar, mas, devido a um arranjo na programação computacional, ao atingir a umidade relativa de 100% o programa registra 99%, para permitir que a simulação ocorra sem o cálculo da quantidade de vapor de água condensado.

De acordo com a simulação, a condensação ocorreria nos primeiros instantes da secagem. Isto ocorre porque à medida em que a frente de secagem avança através da massa de grãos a umidade relativa decresce, não havendo mais o risco de ocorrência de condensação.

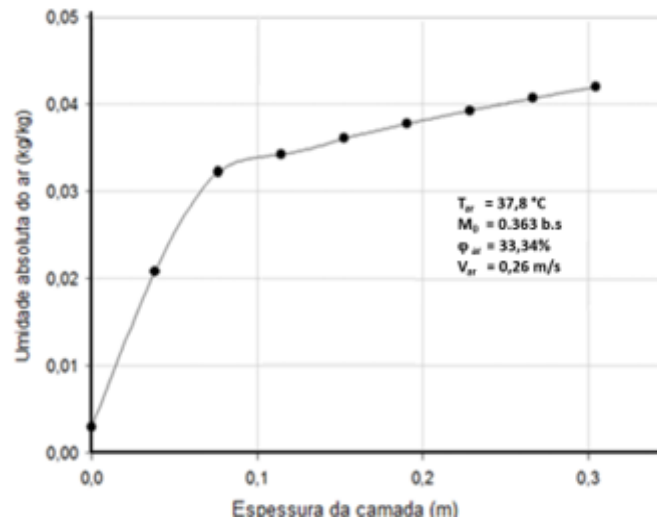
É possível, também, analisar o comportamento do processo de secagem, analisando a variação da umidade absoluta do ar ao longo da camada de grãos, o que pode confirmar as variações de umidade relativa apresentadas na Tabela 2. A umidade absoluta do ar aumenta ao longo da massa de grãos, indicando a retirada de água evaporada dos grãos e transferindo-a para o ar de secagem, conforme pode ser observado na Figura 17.

Tabela 2 – Variação da umidade relativa do ar intergranular durante o processo de secagem, para temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem de 37,8°C, 33,34% e 0,26 m/s, respectivamente, e teor de água inicial dos grãos igual a 0,363 b.s.

Tempo (s)	Camadas de grãos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,08	0,70	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
24	0,08	0,54	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
48	0,08	0,46	0,83	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
72	0,08	0,40	0,73	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
96	0,08	0,37	0,66	0,95	0,99	0,99	0,99	0,99
120	0,08	0,34	0,61	0,87	0,99	0,99	0,99	0,99
144	0,08	0,32	0,56	0,81	0,99	0,99	0,99	0,99
168	0,08	0,30	0,52	0,75	0,97	0,99	0,99	0,99
192	0,08	0,29	0,49	0,71	0,92	0,99	0,99	0,99
216	0,08	0,27	0,47	0,67	0,87	0,99	0,99	0,99
240	0,08	0,26	0,45	0,64	0,83	0,99	0,99	0,99
264	0,08	0,25	0,43	0,61	0,79	0,96	0,99	0,99
288	0,08	0,25	0,41	0,58	0,75	0,92	0,99	0,99
312	0,08	0,24	0,39	0,56	0,72	0,89	0,99	0,99
336	0,08	0,23	0,38	0,54	0,70	0,85	1,00	0,99
360	0,08	0,23	0,37	0,52	0,67	0,82	0,97	0,99
384	0,08	0,22	0,36	0,50	0,65	0,80	0,94	0,99
408	0,08	0,22	0,35	0,49	0,63	0,77	0,91	0,99
432	0,08	0,21	0,34	0,47	0,61	0,75	0,88	0,99
456	0,08	0,21	0,33	0,46	0,59	0,73	0,86	0,99
480	0,08	0,21	0,33	0,45	0,58	0,71	0,84	0,99
504	0,08	0,20	0,32	0,44	0,56	0,69	0,82	0,99
528	0,08	0,20	0,31	0,43	0,55	0,67	0,80	0,99
552	0,08	0,20	0,31	0,42	0,54	0,66	0,78	0,99
576	0,08	0,19	0,30	0,41	0,53	0,64	0,76	0,99

Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

Figura 17 – Variação da umidade absoluta do ar durante o processo de secagem.



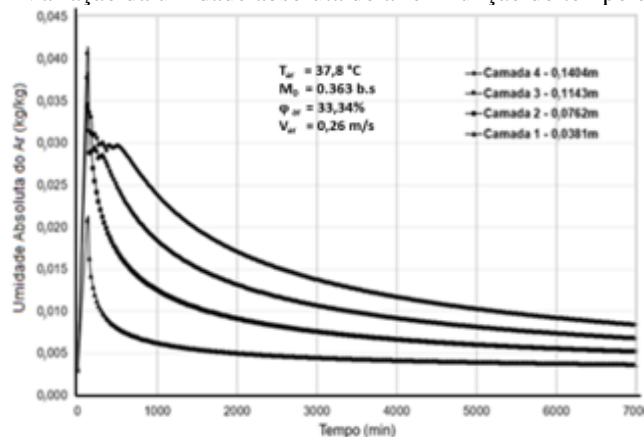
Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

A variação da umidade absoluta do ar intergranular, em função do tempo, é mostrada na Figura 18, na qual pode-se observar que o ar de secagem atinge um pico de saturação e, de acordo com o avanço da frente de secagem, ocorre a redução deste pico.

Para consolidar a validação do modelo de secagem em camada espessa, conforme foi apresentado na seção de resultados, foram realizadas várias simulações, utilizando as mesmas condições de secagem dos experimentos realizados por Martins (1988), para milho híbrido, variedade FRB73xMO17.

As comparações dos resultados simulados com os dados experimentais de Martins (1988) atestam a validade do modelo MSU de secagem em camada estacionária, em que as análises, realizadas por meio de testes de correspondências dos resultados simulados e experimentais, mostraram uma correspondência superior a 99%.

Figura 18 – Variação da umidade absoluta do ar em função do tempo de secagem.



Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

Utilizando os resultados simulados de secagem em camada fina e dados experimentais obtidos de Martins (1988), foram realizadas análises estatísticas para determinar o desvio médio relativo (D_{mr}), o erro padrão da estimativa (E_{pe}) e o erro máximo da estimativa (E_{me}), calculados pelas Equações 17, 18 e 19.

$$D_{mr} = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{y_j - \hat{y}_j}{y_j} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot 100 \quad (17)$$

$$E_{pe} = \frac{\left[\sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{n-1} \quad (18)$$

$$E_{me} = \max_{1 \leq j \leq n} |y_j - \hat{y}_j| \quad (19)$$

Os resultados da análise estatística dos dados de secagem em camada fina, para as condições de secagem especificadas, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados da análise estatística, para temperatura e umidade relativa iguais a 37,8°C, 33,34%, respectivamente, e teor de água inicial dos grãos igual a 0,363 b.s., para velocidade variável do fluxo de ar.

Condições de secagem	Desvio médio relativo (%)	Erro padrão da estimativa	Erro máximo da estimativa
T = 37,8°C; v = 0,26m/s	0,987	0,0000068	0,00499
T = 37,8°C; v = 0,54m/s	1,041	0,0001094	0,00393
T = 65,6°C; v = 0,26m/s	0,207	0,0000043	0,00327
T = 65,6°C; v = 0,54m/s	0,299	0,0000090	0,00394
T = 93,3°C; v = 0,26m/s	2,601	0,0006843	0,00985
T = 93,3°C; v = 0,54m/s	2,113	0,0004518	0,00742
T = 118,8°C; v = 0,26m/s	0,880	0,0000784	0,00356
T = 118,8°C; v = 0,54m/s	1,036	0,0001086	0,00551

Fonte: Elaborado pelo AUTOR, 2017.

Observa-se, pela análise dos desvios e dos erros apresentados na Tabela 3, que os maiores valores de desvio relativo e do erro máximo da estimativa ocorreram para a temperatura do ar de secagem igual a 93,3°C. Além disto, o desvio máximo foi 2,60% e o erro máximo da estimativa foi 0,00985. Estes resultados confirmam a adequabilidade do modelo de secagem em camada fina utilizado neste trabalho.

5 CONCLUSÕES

O foco desse trabalho foi desenvolvimento e implementação de um sistema de simulação de secagem de grãos cereais do modelo de secagem e camada estacionário MSU (**Michigan State University**), Para solução das equações do modelo de secagem MSU, foi utilizado o método de diferenças finitas progressivas tanto no espaço quanto no tempo para discretizar as quatro equações diferenciais do modelo, para discretização das equações diferenciais parciais não foi considerada as diferenças finitas retroativas no espaço, para a temperatura do grão e do ar de secagem, conforme realizado por Liu *et al.* (2015).

Principais conclusões desse trabalho foram:

- O procedimento numérico de discretização das equações diferenciais parciais, utilizando um método de Euler de primeira ordem, mostrou-se eficaz da implementação do modelo e apresentou resultados bem acurados.
- Durante o processo de secagem as camadas iniciais secam mais rápido que as camadas superiores.
- A medida que o fluxo de ar passa através das camadas, observar-se uma saturação do ar, o que provoca condensação nas camadas superiores do leito, influenciando no tempo de secagem e na capacidade de transferência de calor e massa entre o ar e o leito.
- Uma análise do processo de secagem em camada fina foi realizada, observando os conceitos fundamentais da teoria de secagem. A compreensão desses conceitos foi fundamental para analisar o processo de secagem em camada espessa.
- Finalmente este trabalho permitiu a construção de um modelo muito próximo da realidade do fenômeno medido em laboratório por Martins (1988), com correspondência entre os resultados maior que 99%.

REFERÊNCIAS

ASAE – American Society of Agricultural Engineers. Moisture Measurement – Grain and Seeds, Standard S352.1, ASAE, St. Joseph, MI 49085, 1988.

BARBOSA DE LIMA, A. G.; DELGADO, J. M. P. Q.; NETO, S. R. F.; FRANCO, C. M. R. Intermittent Drying: Fundamentals, Modeling and Applications. 2016. Springer International Publishing, Switzerland, Drying and Energy Technologies, Advanced Structured Materials 63. DOI 10.1007/978-3-319-19767-8_2

BARKER, J. J. Heat transfer in packed beds. 1965. Ind. Eng. Chem., n.57, p.43-51.

Barros, Dayane & Silva, Ana & Feijo, Danielle & Medeiros, Sandrelli & Cavalcanti, Iago & Silva, José & Leite, Andreza & Santos, Jaciane & Melo, Marcela & Costa, Juliana & Silva, Gabriela &

Oliveira, Gerliny & Rocha, Tamiris & Costa, Maurilia & Padilha, Ana & Ferreira, Silvio & Fonte, Roberta. (2020). Principais Técnicas de Conservação dos Alimentos. Brazilian Journal of Development. 6. 806-821. 10.34117/bjdv6n1-056.

BROOKER, D. B., BAKKER ARKEMA, F. W., HALL, C. W. *Drying Cereal Grains*. 1974. The Avi Publishing Company, Inc. Westport: Connecticut, 256 p.

Brooker, D.B., Baker-Arkema, F.W and Hall, C.W. (1992), *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*, The AVI Publishing Company, New York, US,1992

Chung, D.S. and H. B. Pfof. 1967. Adsorption and Desorption of Water Vapor by Cereal Grains and their Product. Part II: Development of General Isotherm Equation. TRANSACTIONS of the ASAE 10(4):552-555.

Fortes, M. and Ferreira, W. R. (2004), Second law analysis of drying: - modeling and simulation of fluidized bed grain drying, 14th International Drying Symposium (IDS), São Paulo, Brazil, 8p.

HENDERSON, S. M.; PERRY, R. L. *Agricultural Process Engineering*. University of California, 1966. 274 p

LI, H.; MOREY, R. V. Thin-Layer Drying of Yellow Dent Corn. Transactions of the ASAE 27(2), 581-585, 1984.

LIU, Z., WU, Z.; XIAOMENG, W., JIA, S.; WENFU, W. Numerical Simulation and Experimental Study of Deep Bed Corn Drying Based on Water Potential. *Mathematical Problems in Engineering*, V. 2015, Article ID 539846, 13p.

MARTINS, J. H. Thin-Layer Drying Rates of Corn Hybrids Related to Performance of High-Speed, High Temperature Batch Dryer. Department of Agricultural Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, 1988. 340 p. (Ph.D. Thesis).

MUJUMDAR, A.S. *Handbook of industrial drying*. Boca Raton, FL : CRC/Taylor & Francis, 2007.

Pfof, H.B,S.G. Mourer, D.S. Chung and G.A. Miliken. Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. ASAE Paper No. 76-3520,St. Joseph, MI49085,1976.

RANJABARAN, M.; EMADI, B.; ZARE, D. CFD Simulation of Deep-Bed Paddy Drying Process and Performance. *Drying Technology*, V. 32, p.919-934, 2014.

SARAIVA, C. T.; PERES, W. B.; RISSO, J. Manejo da temperatura do ar na secagem intermitente de sementes de arroz irrigado. *Rev. bras. sementes* [online]. 2007, vol.29, n.2, p.23-27.

Thompson, T.L. Predicted Performance and Optimal Design of Convection Grain Dryers. Ph.D. Thesis, Department of Agricultural Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, 1967.

APÊNDICE - LISTA DE SIGLAS

Sigla	Descrição
M	Teor de água do produto (média), base seca, kg/kg ;
M_r	Razão do teor de água do produto, adimensional;
t	Tempo, s;
A	Área superficial de uma partícula (grão), m^2 ;
a	Área superficial específica (média) dos grãos, m^2/m^3 ;
R	Constante de gás ideal, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;
T	Temperatura do fluido (ar), K ou $^{\circ}\text{C}$;
θ	Temperatura do produto (grão), K ou $^{\circ}\text{C}$;
P	Pressão, Pa;
h_{fg}	Calor latente de vaporização da água do produto, J/kg ;
K_{ii}	Coefficientes fenomenológicos,; $i = 1, \dots, 3$;
K_{ij}	Coefficientes de acoplamento,; $j = 1, \dots, 3, j \neq i$;
k	Constante de secagem, $1/\text{s}$
b	Parâmetro empírico da equação de Page.
r	Distância radial ou coordenada espacial, m;
h_D	Coefficiente de transferência de massa por convecção, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;
T	Temperatura do ar de secagem, K ou $^{\circ}\text{C}$;
θ	Temperatura do produto (grão), K ou $^{\circ}\text{C}$;
W	Umidade absoluta do ar (quantidade de vapor de água contida em um quilograma de ar seco), kg/kg ;
x	Coordenada espacial (posição na camada de grãos), m;
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção, $\text{J}/(\text{s}\cdot\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
G	Fluxo de massa, $\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$;
c	Calor específico, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;
ρ	Massa específica, kg/m^3 ;
φ	Umidade relativa do ar, decimal.
μ	Viscosidade, $\text{kg}/(\text{h}\cdot\text{m})$;
a,b, α , β	Constantes empíricas.

D_{mr}	Desvio médio relativo, %;
E_{pe}	Erro padrão da estimativa;
E_{me}	Erro máximo da estimativa;
Y_j	Dados experimentais ou de referências;
\hat{Y}_j	Dados estimados ou simulados;
n	Número de observações ou tamanho da amostra;
D	Coefficiente de difusão, m^2/s ;
V	Volume do produto, m^3 ;
X	Razão adimensional.

Subscritos

0	Estado inicial ou equivalente;
e	Estado de equilíbrio;
a	Referente a ar
abs	Absoluto;
p	Referente a produto;
v	Referente a vapor de água;
w	Referente a água;
bm	Referente a bulbo molhado;
sup	Superficial;
∞	Referente ao ambiente externo ou fluxo livre;