

Validação do modelo matemático de secagem de grãos de milho em leito fixo utilizando CFD

Validation of the mathematical model of corn grain drying in fixed bed using CFD

DOI:10.34117/bjdv8n6-362

Recebimento dos originais: 21/04/2022

Aceitação para publicação: 31/05/2022

Fernando Azalim Júnior

Superior

Instituição: Centro Federal de Educação de Minas Gerais (CEFET-MG)

Endereço: Avenida Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte - Minas Gerais,

CEP: 30510-000, Brasil

E-mail: fernandoazalim.junior@gmail.com

Estevão Lannes Tolentino

Mestrado

Instituição: Centro Federal de Educação de Minas Gerais (CEFET-MG)

Endereço: Avenida Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte - Minas Gerais,

CEP: 30510-000, Brasil

E-mail: estevaotolentino@hotmail.com

José Leônicio Fonseca de Souza

Doutorado

Instituição: Centro Federal de Educação de Minas Gerais (CEFET-MG)

Endereço: Avenida Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte - Minas Gerais,

CEP: 30510-000, Brasil

E-mail: jleonciofs@gmail.com

Leonardo Alves da Costa

Mestrado

Instituição: Centro Federal de Educação de Minas Gerais (CEFET-MG)

Endereço: Avenida Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte - Minas Gerais,

CEP: 30510-000, Brasil

E-mail: leonardoalves.costa@yahoo.com.br

André Guimarães Ferreira

Doutorado

Instituição: Centro Federal de Educação de Minas Gerais (CEFET-MG)

Endereço: Avenida Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte - Minas Gerais,

CEP: 30510-000, Brasil

E-mail: agferreira@cefetmg.br

André Almeida Dias

Mestrado

Instituição: Centro Federal de Educação de Minas Gerais (CEFET-MG)

Endereço: Avenida Amazonas, 7675, Nova Gameleira, Belo Horizonte - Minas Gerais,

CEP: 30510-000, Brasil

E-mail: a.dias@outlook.com

RESUMO

A Fluidodinâmica computacional (CFD) foi usada para simular o comportamento de secagem de um secador de milho de leito fixo bidimensional. O modelo matemático foi validado por meio da comparação com dados experimentais presentes na literatura e foi resolvido com o software ANSYS Fluent 18.0. A ferramenta adicional User-Defined Function (UDF), escrita em linguagem C, foi utilizada para customizar o software, permitindo inserir um modelo de secagem mais completo. O erro relativo percentual (ER%) entre os resultados numéricos e experimentais para o modelo unidimensional variou entre 5,44% e 12,46% demonstrando uma boa predição do comportamento da secagem do leito de grãos de milho. Para o modelo bidimensional, o valor máximo para desvio padrão relativo percentual (DPR%) entre a simulação numérica do modelo proposto e as simulações apresentadas por França et al. (1994) e Souza (1996) foi de 9,39%, também demonstrando uma boa predição.

Palavras-chave: Secagem de milho, CFD.

ABSTRACT

Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to simulate drying behavior of a two-dimensional fixed-bed corn dryer. Mathematical model was validated through comparison with experimental data present in literature and it was solved using ANSYS Fluent 18.0 software. Additional tool User-Defined Function (UDF), writing in C language, was used to customize the software, allowing to insert a more complete drying model. The percentage error (ER%) between the numerical and experimental results for one-dimensional model varied between 5.44% and 12.46%, demonstrating a good prediction of drying corn grains. For two-dimensional model, the maximum value for relative percentage standard deviation (DPR%) between a numerical simulation of proposed model and as simulations by França et al. (1994) and Souza (1996) was 9.39%, also demonstrating a good prediction.

Keywords: corn drying, CFD

1 INTRODUÇÃO

A secagem constitui uma das etapas do pré-processamento dos produtos agrícolas, e tem como objetivo reduzir o percentual de água neles contido. Essa se baseia num processo simultâneo de transferência de calor e massa (umidade) entre o produto e o ar de secagem. Para uma correta execução, é importante que a remoção da umidade seja feita de tal forma que o produto fique em equilíbrio com o ar do ambiente onde será armazenado. Além disso, deve ser feita de modo a preservar a aparência, a qualidade

nutritiva, no caso de grãos, e a viabilidade, como semente (Silva, 2008). Essa remoção de umidade também prolonga o prazo de validade dos produtos e reduz os custos de transporte e armazenamento (De Oliveira e Martins, 2020).

Atualmente, com a evolução da computação e da capacidade de processamento das máquinas, uma grande quantidade de autores tem se dedicado à criação e utilização de modelos matemáticos para prever os fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos na secagem. Muitos autores afirmam que técnicas computacionais de solução de problemas matemáticos têm se mostrado muito precisas e mais economicamente viáveis. A simulação numérica computacional através do método da fluidodinâmica computacional (CFD) se apresenta então como uma importante ferramenta para o desenvolvimento de modelos matemáticos de secagem de grãos.

O ANSYS Fluent é um software comercial que utiliza a ferramenta CFD. Em sua versão padrão não apresenta um modelo específico para secagem de grãos, sendo necessária a utilização da função User-Defined Function (UDF), onde é possível a personalização do programa (Xia e Sun, 2002; Norton e Sun, 2006; Jamaledine e Ray, 2010; Defraeye, 2014).

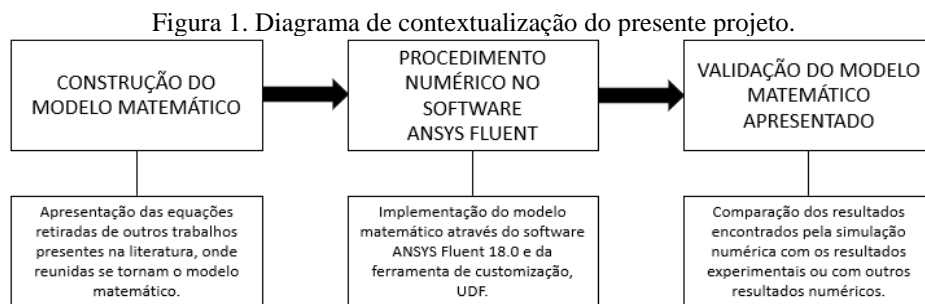
Este trabalho tem como objetivo geral implementar em software CFD um modelo matemático bidimensional de secagem de milho em leito fixo e camada espessa, baseado em modelos de secagem utilizados na literatura. Já os objetivos específicos são: resolver numericamente o modelo matemático de secagem em leito fixo de grãos de milho utilizando o Método dos Volumes Finitos; implementar o modelo matemático de não-equilíbrio por meio do software ANSYS Fluent, utilizando a função avançada UDF; comparar os resultados numéricos obtidos com dados presentes na literatura para validação do modelo matemático.

2 METODOLOGIA

2.1 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático e as equações utilizadas baseiam-se em trabalhos presentes na literatura. As seguintes suposições são de França et al. (1994): um modelo de secagem em camada fina é usado para prever o comportamento da secagem em camada espessa; a contração volumétrica do leito de grãos é desprezível durante a secagem; não há gradiente de temperatura e umidade no interior dos grãos; as paredes do secador são consideradas adiabáticas; o ar de secagem entra no secador com uma vazão constante. Outras suposições foram feitas com base em Thorpe (2008) e Ranjbaran et al. (2014): as

propriedades físicas do ar de secagem variam com a temperatura e o tempo; as propriedades do leito de grãos variam com a umidade contida nos grãos e com o tempo; a transferência de calor por condução entre grãos é considerada; o comportamento do leito de grãos é aproximado a um comportamento de um meio poroso. No presente trabalho, foi usado o modelo térmico de não equilíbrio, ou seja, os grãos e o ar de secagem intergranular estavam em temperaturas diferentes. Para contextualizar o presente projeto, a Figura 1 apresenta o diagrama que caracteriza o problema proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.1 Conservação de massa para o ar

Nield e Bejan (2013), França et al. (1994) e outros autores apresentam a conservação de massa para o ar de secagem através de um meio poroso de acordo com Eq. (1), onde t é o tempo, ε é a porosidade do leito de grãos, ρ_a é a massa específica do ar e \vec{v} é o vetor velocidade para o ar.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_a) + \nabla \cdot (\rho_a \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

2.1.2 Equação da quantidade de movimento para o ar

A equação da quantidade de movimento para o ar de secagem é dada pela Eq. (2) de acordo com Ranjbaran et al. (2013) e Rocha et al. (2013) e segue o modelo de equação de quantidade de movimento para os fluidos de Navier-Stokes. Essa equação leva em consideração uma condição de não escorregamento nas paredes do secador, velocidade do ar na entrada e pressão do ar na saída do secador pré-estabelecidas.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_a \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho_a \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \bar{\tau} + \rho_a \vec{g} + S_m \quad (2)$$

Onde P é a pressão, $\bar{\tau}$ é o tensor de tensões de Reynolds, \vec{g} é o vetor aceleração da gravidade e S_m é o termo fonte. Para fluidos Newtonianos, o tensor de tensões de Reynolds $\bar{\tau}$ é dado pela Eq. (3) (ROCHA et al., 2013).

$$\bar{\tau} = \mu_a \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

Onde μ_a é a viscosidade do ar e I é o tensor unitário.

O termo fonte da equação de conservação da quantidade de movimento representa a resistência do leito de grãos ao escoamento do ar, o que faz gerar uma queda de pressão do fluido à medida que este passa através do meio poroso. Segundo Brooker et al. (1974), essa queda de pressão é devido à perda de energia do ar em consequência do atrito deste com o grão. Hunter (1983) apresenta uma equação para o cálculo da resistência à passagem do ar ao longo do leito de grãos e essa é descrita na Eq. (4).

$$S_m = -Rv - Sv^2 \quad (4)$$

Onde R e S são constantes específicas para cada tipo de grão.

Para o milho, os valores de R e S são $719 \text{ Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ e $6855 \text{ Pa}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente (HUNTER, 1983). Thorpe (2008) afirma que a Eq. (4) assume um comportamento isotrópico para a resistência à passagem do ar, ou seja, os valores para a perda de pressão são independentes da direção do escoamento.

2.1.3 Balanço de umidade para o ar

A equação de balanço de umidade para o ar é apresentada na Eq. (5), onde S_w é o termo fonte, dado pela Eq. (6) (THORPE, 2008; RANJBARAN et al., 2014). As condições de contorno para essa equação incluem fluxo de umidade nulo nas paredes do secador e umidade absoluta do ar pré-estabelecida na entrada do secador.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_a w) + \nabla \cdot (\rho_a \vec{v} w) = \nabla \cdot (\rho_a D_{eff} \nabla w) + S_w \quad (5)$$

$$S_w = -(1 - \varepsilon) \rho_g \frac{\partial M}{\partial t} \quad (6)$$

D_{eff} representa o coeficiente efetivo de difusão de umidade.

2.1.4 Balanço de umidade para o leito de grãos

Neste trabalho será utilizada a equação de secagem de milho para camada fina proposta por Thompson et al. (1968) e empregada por Martins et al. (1982), França et al. (1994) e Souza (1996), com o intuito de prever o teor de umidade do leito de grãos de milho durante a secagem em uma camada espessa de grãos. A Eq. (7) apresenta a taxa de variação do teor de umidade do leito de grãos ao longo do tempo.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{M_e - M}{3600 \sqrt{(-4,10497 + 0,008784 \cdot T)^2 + \left(\frac{1}{900}\right) (1,66209 \cdot 10^5 e^{(-5,9418 \cdot 10^{-2} \cdot T)})^2}} \cdot t \quad (7)$$

Onde M é o teor de umidade dos grãos, M_e é o teor de umidade de equilíbrio para o milho, T é a temperatura do ar em K e t é o tempo em segundos.

A norma ASAE (2007) traz uma série de equações para o cálculo do teor de umidade de equilíbrio M_e para diferentes tipos de grãos. Neste trabalho é utilizada a Eq. (8) apresentada por Thompson et al. (1968).

$$M_e = \sqrt{\frac{\ln(1 - RH)}{-0,688 \cdot (T - 227)}} \quad (8)$$

Onde RH é a umidade relativa do ar de secagem.

2.1.5 Conservação de energia para o ar

Os trabalhos de Thorpe (2008), Rocha et al. (2013) e Ranjbaran et al. (2014) apresentam uma única equação para conservação de energia no formato CFD através da utilização de um modelo térmico de equilíbrio, onde se supõe que o meio poroso e o fluxo

de ar estão em equilíbrio térmico. Neste trabalho considera-se que estes dois não estão em equilíbrio térmico e são propostas duas equações para conservação de energia para o ar de secagem e para o leito de grãos em formato CFD, com base no modelo apresentado por Brooker et al. (1974) e posteriormente utilizado por uma série de autores, tais como Martins et al. (1982), França et al. (1994), Souza (1996), Srivastava e John (2002), Zare et al. (2006) e Naghavi et al. (2010). Assim, a equação de conservação de energia para o ar é apresentada através da Eq. (9) e $S_{h,a}$ é o termo fonte (Eq. (10)) (FAGHRI et al., 2010; NIELD; BEJAN, 2013).

$$\frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon \rho_a E_a] + \nabla \cdot (\rho_a \vec{v} (c_a + c_v w) T) = \nabla \cdot (\varepsilon k_a \nabla T) + S_{h,a} \quad (9)$$

Onde:

$$S_{h,a} = -ha(T - \theta) \quad (10)$$

Onde a é a área superficial específica do grão, h é o coeficiente convectivo, θ é a temperatura absoluta do leito de grãos, c_a é o calor específico do ar seco, c_v é o calor específico do vapor de água e w é a umidade absoluta do ar.

O coeficiente convectivo h pode ser calculado pela Eq. (11) (BARKER, 1965; BROOKER et al., 1992; ZARE et al., 2006, NAGHAVI et al., 2010).

$$h = 0,2755 \cdot c_a \rho_a |v| \left(\frac{2r_0 \rho_a |v|}{\mu_a} \right)^{-0,34} \quad (11)$$

Onde r_0 é o raio equivalente do grão de milho e $|v|$ é o módulo da velocidade na direção principal do escoamento.

Segundo Brooker et al. (1992), os parâmetros r_0 e a para o grão de milho valem 0,00451m e $784\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$, respectivamente.

2.1.6 Conservação de energia para o leito de grãos

A Eq. (12) apresenta a conservação de energia para o leito de grãos e $S_{h,g}$ é o termo fonte (Eq. (13)) (FAGHRI et al., 2010; NIELD;BEJAN, 2013).

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - \varepsilon)\rho_g(c_g + c_w M)\theta] = \nabla \cdot [(1 - \varepsilon)k_g \nabla \theta] + S_{h,g} \quad (12)$$

Onde:

$$S_{h,g} = ha(T - \theta) + [h_{fg} + c_v(T - \theta)](1 - \varepsilon)\rho_g \frac{\partial M}{\partial t} \quad (13)$$

Onde ρ_g , c_g e k_g são respectivamente a massa específica, o calor específico e a condutividade térmica do grão de milho, c_w é o calor específico da água líquida, h_{fg} é o calor latente de vaporização da água para o leito de grãos de milho, apresentado por França et al. (1994) e Souza (1996) e definido pela Eq. (14).

$$h_{fg} = (3153518,6 - 2386,057)(1 + 4,35e^{-28,25M}) \quad (14)$$

Tanto a equação de balanço de energia para o ar quanto para o leito de grãos levam em consideração paredes do secador adiabáticas e temperatura do ar na entrada do secador pré-estabelecida. As propriedades do ar e do milho estão definidas na tabela 1.

Tabela 1. Propriedades do ar e do milho

Parameters	Equations	References
Corn		
ρ_b (kg·m ⁻³)	$702,76 + 595,71(M/1 + M) - 3434(M/1 + M)^2$	Lasseran, 1978
e	$0,39 + 0,095M$	Lasseran, 1978
ρ_g (kg·m ⁻³)	$\rho_b/(1 - e)$	Lasseran, 1978
$(c_g + c_w M)$ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	$1132,7 + 5445,3(M/1 + M)$	Andrade et al., 2004
k_g (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	$0,10473 + 0,434(M/1 + M)$	Andrade et al., 2004
Air		
ρ_a (kg·m ⁻³)	$0,6219 \cdot P_{atm}/287 \cdot T(0,6219 + w)$	Brooker et al., 1974

μ_a (Pa·s)	$1,691 \cdot 10^{-5} + 4,984 \cdot 10^{-8}(T - 273,15) - 3,187$ $\cdot 10^{-11}(T - 273,15)^2 + 1,319$ $\cdot 10^{-14}(T - 273,15)^3$	Pakowski et al., 1991
c_a (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	$1009,26 - 4,0403 \cdot 10^{-3}(T - 273,15) + 6,1759$ $\cdot 10^{-4}(T - 273,15)^2 - 4,097 \cdot 10^{-7}(T - 273,15)^3$	Pakowski et al., 1991
c_v (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	$1883 - 1,6737 \cdot 10^{-1}T + 8,439 \cdot 10^{-4}T^2 - 2,6967 \cdot 10^{-7}T^3$	Pakowski et al., 1991
k_a (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	$7,331 \cdot 10^{-5}T + 0,004071$	Fortes et al., 2006

Fonte: Elaborado pelo autor

2.2 PROCEDIMENTO NUMÉRICO

O modelo matemático foi implementado utilizando o software *ANSYS Fluent 18.0*. A ferramenta para customização do software UDF foi utilizada para realizar algumas tarefas adicionais. As equações diferenciais parciais resultantes dos balanços de massa, energia, quantidade de movimento e balanço de umidade do modelo matemático de secagem de grãos proposto serão resolvidas através do Método de Volumes Finitos (MVF) para cada um dos VC gerados.

No presente trabalho foi utilizado o modelo térmico de não equilíbrio do *ANSYS Fluent 18.0* para meios porosos, baseado em uma abordagem de células duplas, ou seja, cada célula de fluido (porosa) possui uma segunda célula sólida e estas se sobrepõem, sendo espacialmente coincidentes. No caso, a célula fluida (porosa) representa o ar e a célula sólida representa os grãos. O software resolve as equações diferenciais parciais do modelo matemático para ambas as células de maneira simultânea, porém separadas, sendo que as células sobrepostas se interagem através da transferência de calor por convecção e através da transferência de umidade entre o fluido e o sólido. As equações de conservação de energia são resolvidas separadamente para as zonas fluida e sólida.

2.2.1 User-Defined Function (UDF)

Neste trabalho a UDF tem a função de executar as seguintes tarefas:

- Definir as condições de inicialização do modelo, de modo a determinar algumas variáveis iniciais tais como teor de umidade e temperatura do leito de grãos e temperatura, umidade relativa e umidade absoluta para o ar intergranular (ar contido nos espaços vazios do leito de grãos);
- Atualizar os valores do teor de umidade do leito de grãos para cada intervalo de tempo;
- Calcular os termos fontes das equações de conservação de energia e balanço de umidade para o ar;

- Atualizar os valores das propriedades do ar e do milho dependentes da temperatura e do teor de umidade do leito de grãos;

O software *ANSYS Fluent 18.0* possui algumas macros pré-estabelecidas que podem ser utilizadas para criação da UDF. Para este trabalho, foi criada uma UDF utilizando como base as obras de Thorpe (2008) e Ranjbaran et al. (2014). O trabalho de Tolentino (2018) apresenta a estrutura completa da UDF escrita em linguagem C utilizada neste presente trabalho.

3 RESULTADOS

3.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DE ESCOAMENTO DE AR UNIDIMENSIONAL

O modelo matemático proposto foi validado utilizando um secador com escoamento de ar unidimensional. Importante ressaltar, que os dados experimentais foram obtidos do trabalho de Martins et al. (1982), que não contempla um detalhamento do estudo experimental realizado, sendo que as únicas informações disponíveis constam na tabela 2

Tabela 2. Condições iniciais e de contorno do modelo de secagem unidimensional.

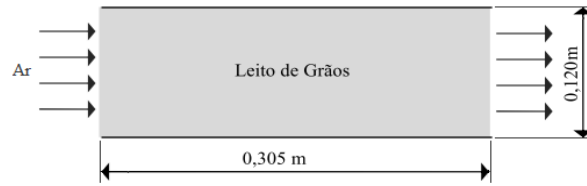
Teste	T_{in} [K]	v_{in} [m·s ⁻¹]	RH_{in} [-]	w_{in} [kg _{água} ·kg _{ar seco} ⁻¹]	T_0 [K]	θ_0 [K]	M_0 [kg _{água} ·kg _{produto seco} ⁻¹]
1	364,1	0,648	0,55	0,0087	294,4	291,9	0,400
2	367,6	0,651	0,68	0,0054	283,8	291,1	0,400
3	372,6	0,658	0,81	0,0038	276,0	281,1	0,387
4	359,8	0,635	0,58	0,0031	278,0	281,3	0,368
5	371,3	0,658	0,60	0,0054	285,8	285,7	0,328
6	377,0	0,668	0,71	0,0058	284,3	284,8	0,316
7	373,1	0,662	0,82	0,0063	283,3	284,1	0,330

Fonte: Martins et al., 1982.

A pressão atmosférica foi considerada como 101325Pa, o escoamento de ar é laminar e foi utilizada uma aceleração da gravidade de 9,81m·s⁻². Onde T_{in} é a temperatura do ar de secagem na entrada do secador, v_{in} é a velocidade do ar na entrada do secador, RH_{in} é a umidade relativa inicial do ar intergranular, w_{in} é a umidade absoluta na entrada do secador, T_0 é a temperatura inicial do ar intergranular, θ_0 é a temperatura inicial do leito de grãos e M_0 é o teor de umidade inicial do leito de grãos.

O secador com escoamento de ar unidimensional de Martins et al. (1982) possui as geometrias conforme a figura 2. A malha computacional foi gerada através do gerador de malhas GAMBIT do *ANSYS Fluent 18.0*.

Figura 2. Geometria do secador com escoamento de ar unidimensional.



Fonte: SOUZA, 1996.

Os resultados experimentais apresentados por Martins et al. (1982) foram comparados com os resultados numéricos obtidos neste trabalho através do Erro Relativo percentual ($ER_{\%}$), definido pela Eq. (15). Os resultados numéricos obtidos por diferentes autores também foram comparados com os resultados numéricos atingidos pelo presente trabalho através do Desvio Padrão Relativo percentual ($DPR_{\%}$), definido pela Eq. (16).

$$ER_{\%} = \frac{|\phi_{exp,i} - \phi_{num,i}|}{\phi_{exp,i}} \cdot 100 \quad (15)$$

$$DPR_{\%} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\phi_{num,i} - \phi_{comp,i}}{\phi_{num,i}} \right)^2} \cdot 100 \quad (16)$$

Onde ϕ_{exp} , ϕ_{num} e ϕ_{comp} são respectivamente os valores dos parâmetros obtidos experimentalmente, numericamente pelo presente trabalho e numericamente pelos outros trabalhos, n é o número total de valores comparados e i é o número do valor, onde $i = 1, 2, 3$.

Na tabela 3 apresenta-se a comparação do teor de umidade médio do leito de grãos \bar{M} obtido através da simulação numérica do presente trabalho com os valores experimentais dos Testes 1 a 7 apresentados por Martins et al. (1982), cujas condições de secagem são mostradas na tabela 2. Zare et al. (2006) afirmam que em muitos trabalhos numéricos de secagem a diferença entre os parâmetros experimentais e os simulados numericamente ficam entre 10 e 15% (BROOKER et al., 1992; TURNER et al., 1997; PABIS et al., 1998). Nota-se que o erro percentual máximo foi de 12,46%, se enquadrando no erro percentual obtido por outros autores.

Tabela 3. Comparação dos resultados numéricos e experimentais.

Teste	Tempo de secagem [min]	\bar{M} num. [kg _{água} ·kg _{produto seco} ⁻¹]	\bar{M} exp.* [kg _{água} ·kg _{produto seco} ⁻¹]	ER% [%]
1	29,6	0,328	0,297	10,44
2	26,0	0,332	0,297	11,78
3	21,3	0,333	0,299	11,37
4	17,2	0,334	0,297	12,46
5	10,3	0,310	0,294	5,44
6	18,4	0,277	0,250	10,80
7	4,9	0,324	0,307	5,54

Fonte: elaborado pelo autor.

Através dos resultados de verificação obtidos anteriormente, nota-se que o modelo matemático proposto obteve uma boa predição do comportamento da secagem do leito de grãos de milho, com diferenças entre os resultados simulados e experimentais aceitáveis. O erro entre os valores calculados e experimentais podem ter ocorrido por uma série de fatores, sendo eles: problemas em prever o comportamento da secagem do milho utilizando uma equação para camada fina para simular o comportamento de uma camada espessa de grãos, a equação para secagem do milho pode não ser adequada ao tipo de milho utilizado experimentalmente, equações de propriedades físicas e térmicas dos materiais incompatíveis, erros nas medições dos parâmetros experimentais e erros na predição da queda de pressão do ar ao longo do leito de grãos.

3.2 COMPARAÇÃO DO MODELO DE ESCOAMENTO DE AR BIDIMENSIONAL

O modelo matemático proposto neste presente trabalho também foi utilizado para simular numericamente a secagem de grãos em um secador com escoamento de ar bidimensional descrito por França et al. (1994), cuja geometria está apresentada na figura 3. Essa geometria não representa um secador real, porém pode ser utilizada para verificar se o modelo numérico é capaz de prever a física da secagem em leito fixo de grãos. Esse secador não é viável na prática pois gera problemas de acúmulo de umidade na extremidade inferior direita, devido a pouca passagem de ar quente por essa região. Após analisar os resultados nesse secador fictício, é possível partir para o estudo de um secador real de leito fixo de grãos encontrado na indústria, como por exemplo um secador cilíndrico com fluxo radial e axial de ar.

Para a simulação numérica bidimensional foram utilizados dados de referência presentes em França et al. (1994). A tabela 4 apresenta as condições iniciais e de contorno de referência da simulação numérica apresentada por França et al. (1994). A pressão atmosférica foi considerada como 101327Pa, o escoamento de ar foi definido como

laminar e foi utilizada uma aceleração da gravidade de $9,81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. $P_{in,man}$ representa a pressão manométrica de ar na entrada.

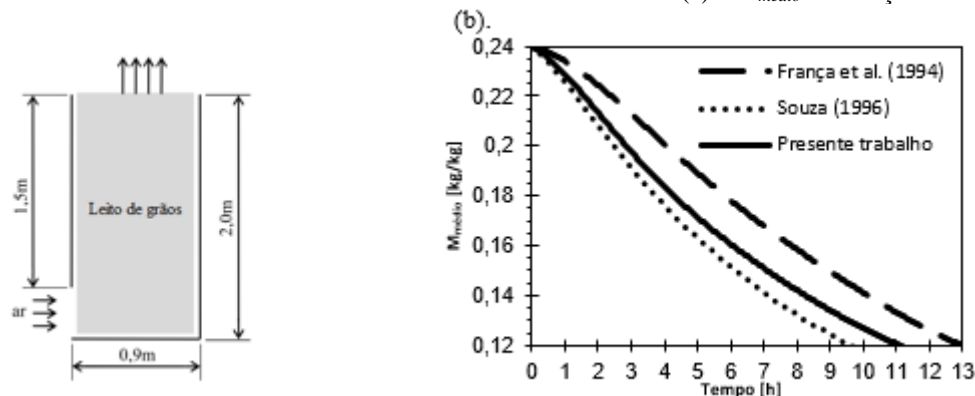
Tabela 4. Condições iniciais e de contorno do modelo de secagem bidimensional.

T_{in} [K]	$P_{in,man}$ [Pa]	RH_{in} [-]	w_{in} [kg _{água} ·kg _{ar seco} ⁻¹]	T_0 [K]	θ_0 [K]	M_0 [kg _{água} ·kg _{produto seco} ⁻¹]
343,15	5000	0,55	0,0109	298,15	293,15	0,240

Fonte: FRANÇA et al., 1994.

A figura 3 também apresenta uma comparação entre as simulações numéricas para o escoamento de ar bidimensional apresentadas por França et al. (1994), Souza (1996) e pelo presente trabalho. Os resultados numéricos obtidos no presente trabalho foram com uma malha computacional gerada através do gerador de malhas GAMBIT do ANSYS Fluent 18.0. Nesta imagem é mostrado o teor de umidade médio do leito de grãos \bar{M} em função do tempo t para as condições de secagem exibidas na Tabela 4.

Figura 3. Geometria do secador com escoamento de ar bidimensional (a) e $M_{médio}$ em função do tempo t



Fonte: (a) SOUZA, 1996; (b) elaborado pelo autor.

Nota-se pela tabela 5 que o valor máximo de $DPR\%$ entre a simulação numérica do modelo proposto e as simulações apresentadas por França et al. (1994) e Souza (1996) foi de 9,39%. Não houve dados experimentais para comparação.

Tabela 5. Comparação do modelo proposto com as simulações numéricas.

	Comparação	\bar{M} em função de t
DPR% [%]	França et al. (1994)	9,39
	Souza (1996)	5,18

Fonte: elaborado pelo autor.

Como o leito de grãos utilizado para esta simulação é maior que o utilizado para o modelo de escoamento de ar unidimensional, o tempo de simulação procedeu-se por

um período bem superior, gastando 34518s para chegar ao teor de umidade médio do leito de grãos de 13%. Foi possível notar que o comportamento da secagem se deu de forma muito parecida com o comportamento da secagem do modelo de escoamento de ar unidimensional, e também com resultados apresentados por França et al. (1994) e Souza (1996) para a simulação de um secador com escoamento de ar bidimensional. Como previsto, a secagem processou-se em camadas, com a formação de zonas de secagem.

Nos primeiros períodos de simulação, as camadas de grãos mais próximas à entrada de ar quente do secador possuem maior disponibilidade de entalpia, se aquecem mais rápido e conseqüentemente secam de forma mais veloz que as camadas de grãos mais distantes da entrada do secador. À medida que o ar atravessa o leito de grãos, este vai retirando umidade dos grãos, aumentando a umidade absoluta do ar e conseqüentemente a umidade relativa do mesmo. Observou-se que nos períodos iniciais de secagem grande parte do ar intergranular encontra-se saturado, ou seja, com um valor de umidade relativa de 100%. Isso ocorre devido ao elevado teor de umidade do leito de grãos no início da simulação e à medida que o ar transporta umidade para regiões já saturadas, este pode condensar e fazer aumentar o teor de umidade do leito de grãos destas regiões, já que o M inicial foi de $0,24 \text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto seco}}^{-1}$ e nessas regiões o M alcançou $0,25 \text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto seco}}^{-1}$. No modelo apresentado pelo presente trabalho limitou-se a umidade relativa do ar de ultrapassar os 100% para não contradizer a realidade física e matemática do problema, já que o ar não possui capacidade infinita de absorção de umidade e nem o grão pode apresentar teor de umidade de equilíbrio M_e infinito, uma vez que este também não possui capacidade infinita de absorção de umidade. Este fenômeno também foi demonstrado por França et al. (1994). Logo, o modelo matemático proposto foi capaz de prever o fenômeno da secagem em um leito de grãos com escoamento de ar bidimensional, e está de acordo com o comportamento apresentado por França et al. (1994) e Souza (1996).

4 CONCLUSÕES

Este trabalho visou à elaboração de um modelo bidimensional de secagem de milho em leito fixo e camada espessa em formato CFD, através de dados contidos na literatura. Por meio da utilização do software *ANSYS Fluent 18.0* e da função *User-Defined Function* foi possível solucionar o modelo matemático proposto para dois tipos de escoamento do ar de secagem: unidimensional e bidimensional. Os resultados obtidos com a simulação numérica deste presente trabalho foram validados com dados

experimentais contidos na literatura e comparados com os resultados numéricos obtidos por outros autores, de maneira que foram alcançados resultados próximos. Assim, pode-se dizer que o modelo matemático proposto pelo presente trabalho obteve uma boa predição do comportamento da secagem do leito de grãos de milho.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. T.; COUTO, S. M.; QUEIROZ, D. M.; PEIXOTO, A. B. Determinação de propriedades térmicas de grãos de milho. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 28, n. 3, p. 488-498, 2004.

ASAE D245.6. Moisture relationships of plant-based agricultural products. Saint Joseph: ASABE, 2007.

BARKER, J. Heat transfer in packed beds. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 57, n. 4, p. 43-51, 1956.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. Drying cereal grains. Westport: The AVI Publishing Company Inc., 1974. 265 p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. Drying and storage of grains and oilseeds. Nova Iorque: Van Nostrand Reinold, 1992. 450 p.

DEFRAEYE, T. Advanced computational modelling for drying processes - A review. *Applied Energy*, v. 131, p. 323-344, 2014.

DE OLIVEIRA, Wanderson Leandro; MARTINS, José Helvecio. Simulação de secagem de milho em camada estacionária por meio de modelagem computacional. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, 2020.

FAGHRI, A.; ZHANG, Y.; HOWELL, J. Advanced heat and mass transfer. Columbia: Global Digital Press, 2010. p. 956.

FORTES, M.; FERREIRA, D. A.; FERREIRA, W. R.; SOUZA, A. C. Modelagem de um condicionador de ar de alta precisão para uso em processamento agrícola. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 578-589, 2006.

FRANÇA, A. S.; MARTINS, M.; HAGHIGHI, K. Numerical simulation of intermittent and continuous deep-bed drying of biological materials. *Drying Technology*, v. 12, n. 7, p. 1537-1560, 1994.

HUNTER, A. J. Pressure difference across an aerated seed bulk for some common duct and store cross-sections. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 28, n. 5, p. 437-450, 1983.

JAMALEDDINE, T. J.; RAY, M. B. Application of Computational Fluid Dynamics for Simulation of Drying Processes: A Review. *Drying Technology*, v. 28, n. 2, p. 120-154, 2010.

LASSERAN, J. C. Princípios gerais de secagem. *Revista Brasileira de Armazenamento*, v.3, n. 3, p. 17-46. 1978.

MARTINS, J. H.; PINHEIRO FILHO, J. B.; FORTES, M.; SEDIYAMA, G. C. Simulação de secagem de milho em camada estacionária. *Revista Brasileira de Armazenamento*, v. 7, n. 1, p. 5-18, 1982.

NAGHAVI, Z.; MOHEB, A.;

ZIAEI-RAD, S. Numerical simulation of rough rice drying in a deep-bed dryer using non-equilibrium model. *Energy Conversion and Management*, v. 51, n. 2, p. 258-264, 2010.

NIELD, D.; BEJAN, A. *Convection in porous media*. 4.ed. Nova Iorque: Springer, 2013. 778 p.

NORTON, T.; SUN, D. W. Computational fluid dynamics (CFD)-an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. *Trends in Food Science & Technology*, v. 17, n. 11, p. 600-620, 2006.

PABIS, S.; JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S. *Grain drying – theory and practice*. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1998. 311 p

PAKOWSKI, Z.; BARCTCZAK, Z.; STRUMILLO, C.; STENSTROM, S. Evaluation of equations approximating thermodynamic and transport properties of water, steam and air for use in cad of drying processes. *Drying Technology*, v. 9, n. 3, p. 753-773, 1991.

RANJBARAN, M.; ZARE, D. Simulation of energetic and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. *Energy*, v. 59, p. 484-493, 2013.

RANJBARAN, M.; EMADI, B.; ZARE, D. CFD simulation of deep-bed paddy drying process and performance. *Drying Technology*, v. 32, n. 8, p. 919-934, 2014.

ROCHA, K. S.; MARTINS, J. H.; MARTINS, M. A.; SARAZ, J. A.; LACERDA FILHO, A. F. Three-dimensional modeling and simulation of heat and mass transfer processes in porous media: An application for maize stored in a flat bin. *Drying Technology*, v. 31, n. 10, p. 1099-1106, 2013.

SILVA, J. S. *Secagem e armazenamento de produtos agrícolas*. 2.ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 560 p.

SOUZA, J. L. F. *Simulação de secador cilíndrico de grãos com fluxos radial e axial de ar*. 97 f. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: UFMG, 1996.

SRIVASTAVA, V. K.; JOHN, J. Deep bed grain drying modeling. *Energy Conversion and Management*, v. 43, n. 13, p. 1689-1708, 2002.

THOMPSON, T. L., PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying – A new model. *ASAE, Saint Joseph*, v. 11, n. 4, p. 582-586, 1968.

THORPE, G. R. The application of computational fluid dynamics codes to simulate heat and moisture transfer in stored grains. *Journal of Stored Products Research*, v. 44, n. 1, p. 21-31, 2008.

TOLENTINO, E. L. Análise energética e exergética da secagem de grãos de milho em leito fixo utilizando o modelo CFD. x f. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: CEFET-MG, 2018.

TURNER, I.; ARUN, S.; MUJUMDAR, A. R.; Mathematical modeling and numerical techniques in drying technology. Nova Iorque: Marcel Dekker, 1997. 679 p.

VITORINO, R. B. Modelagem e simulação matemática do processo de secagem de milho. 52 f. Dissertação de Mestrado. Dourados: UFGD, 2009.

XIA, B.; SUN, D. W. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 34, n. 1-3, p. 5-24, 2002.
ZARE, D.; MINAEI, S.; ZADEH, M. M.; KHOSHTAGHAZA, M. H. Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. *Energy Conversion and Management*, v. 47, n. 18, p. 3241-3254, 2006.

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Área superficial específica do leito de grãos [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$]
c	Calor específico [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
D_{eff}	Coefficiente efetivo de difusão de umidade para o leito de grãos [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
$DPR\%$	Desvio Padrão Relativo percentual
E	Entalpia [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
$ER\%$	Erro Relativo percentual
\vec{g}	Vetor gravidade [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
h	Coefficiente convectivo de transferência de calor [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]
h_{fg}	Calor latente de vaporização da água [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
I	Tensor unitário [-]
k	Condutividade térmica [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
M	Teor de umidade do leito de grãos, bulbo seco [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto seco}}^{-1}$]
M_e	Teor de umidade de equilíbrio do leito de grãos, bulbo seco [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto seco}}^{-1}$]
P	Pressão [Pa]
P_{atm}	Pressão atmosférica [Pa]
r_0	Raio equivalente do grão de milho [m]
R	Constante específica para o grão de milho [$\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$]
RH	Umidade relativa do ar de secagem [-]
S	Constante específica para o grão de milho [$\text{Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$]
$S_{h,a}$	Termo fonte da equação de energia para o ar [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$]
$S_{h,g}$	Termo fonte da equação de energia para o leito de grãos [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$]
S_m	Termo fonte da equação de quantidade de movimento para o ar [$\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$]
S_w	Termo fonte da equação de balanço de umidade para o ar [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]
t	Tempo [s]
T	Temperatura absoluta do ar de secagem [K]
v	Velocidade [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
\vec{v}	Vetor velocidade [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
w	Umidade absoluta do ar, bulbo seco [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$]

Letras gregas

ε	Porosidade do leito de grãos [-]
θ	Temperatura absoluta do leito de grãos [K]
μ	Viscosidade [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
ρ	Massa específica [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
$\bar{\tau}$	Tensor de tensões de Reynolds [Pa]
ϕ	Variável de interesse

Subscritos e sobrescritos

0	Valores iniciais (ambiente)
a	Ar
b	Leito de grãos
$comp$	Valor da simulação numérica de outros autores a fim de comparação
exp	Valor experimental
g	Grão de milho
in	Entrada
num	Valor da simulação numérica do presente trabalho
v	Vapor de água
w	Água