

Simulações Computacionais do Fluxo de Ar em Secador de Fluxo Misto

Ricardo Klein Lorenzoni¹, Manuel Osório Binelo², Aline Tampke Dombrowski³
UNIJUI, Ijuí, RS
Vanessa Faoro⁴
UFSM, Palmeira das Missões, RS

Resumo. Compreender o fluxo do ar dentro dos secadores de fluxo misto é essencial para o seu correto dimensionamento e definições de variáveis importantes durante o processo de secagem. Neste trabalho, analisou-se o fluxo do ar em um secador de fluxo misto carregado com trigo, avaliando o impacto da porosidade da massa de grãos no fluxo do ar e na pressão dentro do equipamento. Com base em dados experimentais, definiu-se a vazão de ar de uma camada vertical do secador e variou-se a porosidade da massa de grãos para determinar até encontrar a porosidade relativa a pressão obtida por meio das medições experimentais. Concluiu-se que dada a vazão de ar e a pressão interna do secador, a porosidade da massa de grãos no equipamento era de 41,6834. Além disto, foi possível concluir que a porosidade impacta diretamente a pressão.

Palavras-chave. Secador de Fluxo Misto, Método dos Volumes Finitos, OpenFOAM, Darcy-Forchheimer, Secagem de Grãos.

1 Introdução

A secagem de grãos possibilita a colheita dos grãos antes que atinjam a umidade recomendada para armazenamento, reduzindo a probabilidade de perdas relacionadas à permanência dos grãos maduros na planta. Além disto, possibilita a conservação dos grãos por grandes períodos de tempo, sem alteração de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, para posterior comercialização [9].

Os secadores de fluxo misto (SFM) são amplamente utilizados na agricultura e na indústria [11] e o fluxo de ar neste tipo de equipamento já foi objeto de diversos estudos. Em [2], o secador é considerado como um conjunto de elementos de fluxo de ar concorrente e contracorrente. Já em [3], os autores demonstraram que 30% do volume do secador opera em regime cruzado. Em [6], um modelo bidimensional de um secador de fluxo misto foi desenvolvido utilizando blocos unidimensionais de fluxo concorrente, contracorrente e cruzado.

Em [20] os autores analisaram experimental e computacionalmente o fluxo de ar através da camada de grãos e o fluxo dos grãos. A não uniformidade do fluxo dos grãos, mais rápido no centro e mais lento nas paredes, resulta em uma secagem não uniforme, devido à isto, propuseram um novo modelo de secador, aumentando a incidência do fluxo cruzado, com o intuito de aumentar a eficiência da secagem. Já [15] analisaram a distribuição do fluxo de ar em secadores de fluxo misto para diferentes tipos de grãos e diferentes arranjos de dutos de ar e determinaram que a distribuição dos dutos de entrada e saída de ar exerce grande influência no fluxo do ar.

¹ricardo.lorenzoni@sou.unijui.edu.br

²manuel.binelo@unijui.edu.br

³alinetampke@hotmail.com

⁴vanessa.faoro@ufsm.br

Em [7] os autores estudaram o processo de secagem de grãos em SFM, e determinaram que através do controle de fluxo do ar e da temperatura, o desempenho do secador melhora, entretanto, as vantagens dependem do tipo de grão e da umidade do mesmo. Em [14] foi realizado um estudo do fluxo de ar em SFM com camada dupla, onde, alternadamente, uma das camadas do secador é fechada, aumentando assim a camada de grãos percorrida pelo ar de secagem. Através de simulações computacionais, o autor percebeu que esta metodologia afeta o fluxo de ar, aumentando a contrapressão e conseqüentemente, reduzindo a velocidade de fluxo do ar.

Em [12] e [21] os autores propuseram duas diferentes configurações de SFM e os resultados mostram que com as novas configurações do secador, as condições de secagem são significativamente homogeneizadas, evitando-se diferenças em relação à umidade e temperatura do grão. Embora grande parte dos trabalhos demonstrem as linhas de fluxo de ar, bem como as linhas isóbaras de pressão, em poucos trabalhos os valores da velocidade de fluxo do ar, bem como da pressão são apresentados. O objetivo do presente trabalho é analisar o fluxo de ar e a pressão interna em um secador de fluxo misto carregado de trigo utilizando o modelo de Darcy-Forchheimer e confrontar os resultados das simulações computacionais com dados experimentais obtidos em uma unidade de secagem de grãos para a produção de sementes.

2 Materiais e Métodos

2.1 Dados experimentais

Os dados experimentais foram obtidos em um secador TC80 da empresa Mega - TMSA, com capacidade estática de 42.000 kg, que opera na faixa de temperatura entre 30^o e 55^oC. Por meio de um anemômetro foram realizadas as medições da velocidade do ar em 18 pontos diferentes do secador, por dentro das calhas (Figura 1, letras) logo acima da massa de grãos. Os dados de pressão (Figura 1, números) foram obtidos das câmaras de difusão de entrada e saída de ar, por meio de um manômetro. Os dados de velocidade do ar e de pressão dentro do secador são apresentados respectivamente nas Tabelas 1 e 2 a seguir.

Tabela 1: Resultados experimentais da pressão do ar.

Pressão de entrada (Pascal)	Pressão de saída (Pascal)
-205,80	-313,00
-166,60	-323,00
-176,40	-284,00
-188,70	-294,00
-184,375	-303,5

No secador avaliado, a torre de secagem é composta por 4 módulos de secagem, cada um deles composto de 90 dutos de entrada e 90 dutos de saída de ar. Considerando a velocidade média do ar de 6,695 m/s e que os dutos de saída para o difusor possuem uma área total de 4,4m², a total de ar do secador é de 29,458m³/s. Já a diferença de pressão média entre os difusores de entrada e saída é de 119,125 Pascal.

2.2 Dinâmica de Fluidos Computacionais

Inicialmente a dinâmica de fluidos computacionais foi aplicada na indústria aeronáutica e aeroespacial, porém, devido a sua eficiência, passou a ser utilizadas na área automotiva, nuclear, eletrônica, entre outras [13]. O OpenFOAM é um framework orientado a objetos desenvolvido em

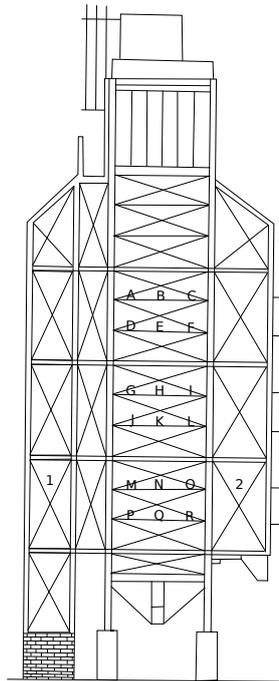


Figura 1: Diagrama dos pontos de coleta de dados experimentais

Tabela 2: Resultados experimentais da velocidade e temperatura do ar.

Indicador	Entrada do ar		Saída do ar	
	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Velocidade (m/s)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Velocidade (m/s)
A	37,75	7,25	33,50	7,84
B	37,70	7,25	33,25	5,68
C	37,35	7,12	32,85	7,00
D	37,30	7,12	32,80	7,02
E	37,30	6,85	32,55	8,42
F	37,30	6,79	32,70	7,47
G	36,95	6,73	32,60	7,42
H	36,85	6,73	32,50	7,00
I	36,60	5,71	32,50	5,54
J	31,80	5,20	33,20	7,63
K	31,90	5,27	34,10	8,34
L	32,95	4,88	33,20	5,80
M	32,95	4,86	32,50	7,02
N	32,90	6,18	33,30	8,40
O	32,85	6,07	32,70	7,60
P	32,85	6,79	33,50	7,67
Q	32,90	6,18	33,10	7,00
R	31,90	5,39	34,80	5,80

C++ e utilizado para resolver problemas de mecânica de meios contínuos incluindo problemas de dinâmica dos fluidos computacional [19], onde computadores são utilizados para realizar os cálculos

que definem a simulação do movimento dos fluidos e a sua interação com as condições de contorno [16].

Um dos modelos utilizados pelo openFOAM é o modelo Darcy-Forchheimer, amplamente utilizado para a simulação de diversos problemas de fluxo de ar em meios porosos [5, 10, 17]. O modelo de Darcy-Forchheimer é dado pela equação:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho u_i) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_i \quad (1)$$

onde γ é a porosidade. O termo fonte S_i , dado pela equação de Darcy-Forchheimer é composto por dois termos, o primeiro é a perda viscosa e o segundo é a perda inercial, e para o caso homogêneo ela é:

$$S_i = - \left(\mu D + \frac{1}{2} \rho |u_{jj}| F \right) u_i. \quad (2)$$

2.3 Simulações Computacionais

As simulações computacionais utilizaram uma réplica da estrutura interna de uma seção do secador objeto deste estudo. Na Figura 2, pode-se ver um diagrama da geometria definida. As simulações foram realizadas considerando todas as seções verticais do equipamento, para compreender o comportamento do fluxo de ar e da pressão em toda a estrutura de um secador de fluxo misto.

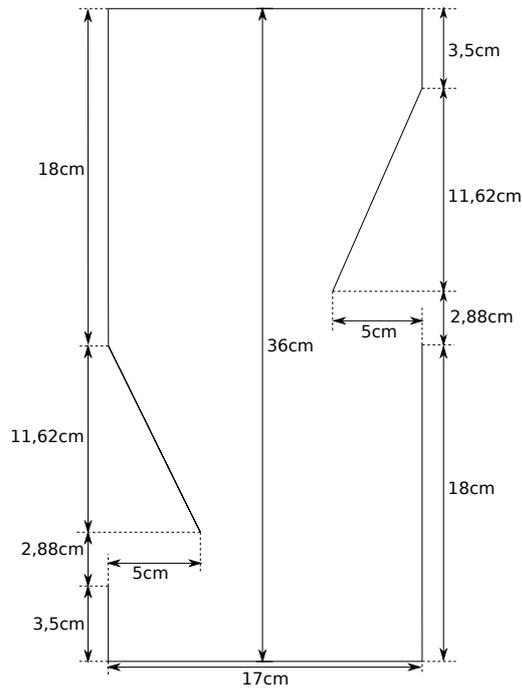


Figura 2: Diagrama de uma seção do secador.

Uma primeira simulação foi realizada com a porosidade de 0,48, apresentada em [4], onde a autora realizou a modelagem matemática do fluxo de ar neste modelo de secador carregado com grãos de trigo. Onde a autora analisou o fluxo do ar com uma adaptação do resolvidor proposto

por [8], obtendo uma diferença de pressão mais de 30 pascal abaixo da esperada. Devido a isto, realizou-se uma nova simulação com porosidade de 43%, também apresentada em [4].

A segunda simulação também apresentou pressão abaixo da encontrada nos dados experimentais, então, optou-se por buscar a porosidade média da massa de grãos na literatura. Em [1], a porosidade da massa de grãos de trigo é de 41,2%. Novamente o resultado não coincidiu com os dados experimentais, entretanto, desta vez, a pressão ficou acima da obtida experimentalmente. Tendo isto em vista, para determinar a porosidade correta, optou-se por utilizar o método de bisseção. Um total de 9 iterações foram realizadas e a pressão obtida na ultima iteração de foi 119,125 pascal, com uma porosidade de 41,6834.

3 Resultados e Discussão

Analisar a pressão em um secador é importante para a averiguação da eficiência da aeração, possibilitando a detecção de variações na velocidade do ar, que podem resultar em uma secagem não uniforme dos grãos. Como pode ser visto na tabela 2, a variação média da pressão entre os difusores de entrada e de saída é de 119.125 Pascal. A Figura 3c apresenta a distribuição da pressão do ar após a determinação da porosidade da massa de grãos por meio do método de bisseção.

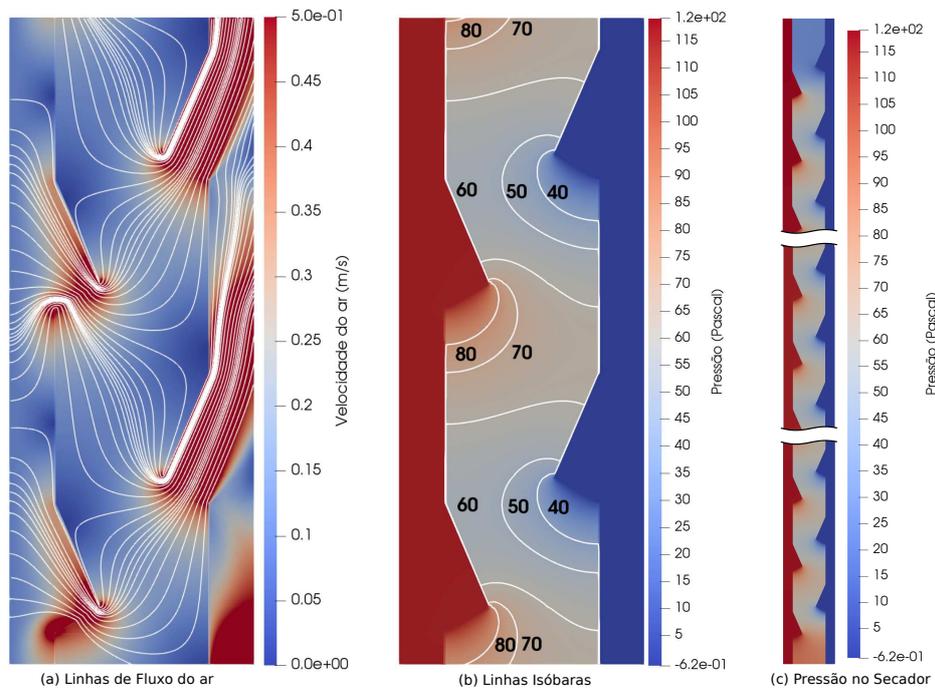


Figura 3: Fluxo de ar, Linhas Isóbaras e Distribuição da pressão no secador.

Como pode-se ver na Figura 3c, a pressão apresenta-se uniforme em toda a estrutura do secador, diferindo apenas na parte superior e inferior, onde, não representa a geometria do secador, sendo aberta e não fechada, para possibilitar o fluxo dos grãos. No restante do equipamento, a pressão demonstra-se constante, em torno de 119 Pascal no difusor de entrada, variando entre os 80 e os 30 Pascal (como pode ser visto na Figura 3b) dentro da massa de grãos e próximo de 0 no difusor de saída. Percebe-se também ao analisar a Figura, que no secador analisado o ar que entra na camada de grãos por uma camada vertical irá, obrigatoriamente, deixar a camada de grãos pela

coluna ao lado, reduzindo o distância percorrida pelo ar na massa de grãos. A Figura 3a apresenta as linhas de fluxo do ar em uma região localizada na região central de um secador de grãos. Nela, é possível notar que o fluxo de ar proveniente de uma entrada, flui, parte para a saída de ar inferior à entrada e outra parte em direção a saída de ar superior.

Na Figura 3a também é possível verificar que a velocidade do ar dentro do secador apresenta variações consideráveis, com velocidades maiores em um linha reta entre as saídas e entradas de ar, e menores nas regiões acima das calhas. A velocidade de fluxo do ar varia entre 0 e 0,25 m/s, resultado muito semelhante ao apresentado em [18]. Já em [20] os autores utilizaram um modelo de secador um pouco diferente, entretanto o fluxo do ar apresentou velocidades semelhantes aos resultados encontrados.

4 Considerações Finais

A determinação da porosidade da massa de grãos para a análise do fluxo de ar em um dispositivo é fundamental para a obtenção de dados confiáveis. Tendo em vista que, a obtenção desta informação dentro deste tipo de equipamento é uma tarefa difícil, demanda-se de novos métodos para a obtenção de tal informação. No presente trabalho utilizou-se de dados conhecidos, como a pressão média dentro de um secador, e a média de ar do equipamento para inferir a porosidade da massa de grãos dentro do mesmo. Além disto, foi possível verificar que a porosidade utilizada para analisar o fluxo de ar nestes equipamentos, impacta diretamente no resultado da pressão.

Em trabalhos futuros pretende-se realizar estudos para obter dados experimentais da porosidade de diferentes tipos de grãos em geometrias semelhantes às encontradas pelos grãos em secadores de fluxo misto a fim de confrontá-los com dados encontrados na literatura, bem como, com resultados de simulações computacionais que serão realizadas para validar a acurácia de métodos numéricos para simular este tipo de domínio discreto.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Essa pesquisa conta com o auxílio financeiro da FAPERGS, edital ARD 04/2019, termo de outorga 19/2551-0001360-4

Referências

- [1] Josephine M Boac et al. “Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles”. Em: **2009 Reno, Nevada, June 21-June 24, 2009**. American Society of Agricultural e Biological Engineers. 2009, p. 1.
- [2] DM Bruce. “Simulation of multiple-bed concurrent-, counter-, and mixed-flow grain driers”. Em: **Journal of Agricultural Engineering Research** 30 (1984), pp. 361–372.
- [3] S Cenkowski, M Miketinac, A Kelm et al. “Airflow patterns in a mixed-flow dryer”. Em: **Canadian Agricultural Engineering** 32.1 (1990), pp. 85–90.
- [4] Aline Tampke Dombrowski. “Modelagem matemática e simulação 3D da distribuição do ar em secadores de fluxo misto”. Em: (2019).
- [5] Mengyao Gao, Xuduo Cheng e Xiaocui Du. “Simulation of bulk density distribution of wheat in silos by finite element analysis”. Em: **Journal of Stored Products Research** 77 (2018), pp. 1–8.

- [6] SA Giner, DM Bruce e S Mortimore. “Two-dimensional simulation model of steady-state mixed-flow grain drying. Part 1: The model”. Em: **Journal of Agricultural Engineering Research** 71.1 (1998), pp. 37–50.
- [7] Heikki T Jokiniemi e Jukka M Ahokas. “Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer”. Em: **Biosystems engineering** 121 (2014), pp. 209–220.
- [8] OA Khatchatourian e MO Binelo. “Simulation of three-dimensional airflow in grain storage bins”. Em: **Biosystems engineering** 101.2 (2008), pp. 225–238.
- [9] Vanessa Maldaner et al. “Effects of intermittent drying on physicochemical and morphological quality of rice and endosperm of milled brown rice”. Em: **LWT** 152 (2021), p. 112334.
- [10] Narjes Malekjani e Seid Mahdi Jafari. “Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches”. Em: **Trends in food science & technology** 78 (2018), pp. 206–223.
- [11] J Mellmann et al. “Moisture content and residence time distributions in mixed-flow grain dryers”. Em: **Biosystems Engineering** 109.4 (2011), pp. 297–307.
- [12] Jochen Mellmann, Fabian Weigler e Holger Scaar. “Research on procedural optimization and development of agricultural drying processes”. Em: **Drying technology** 37.5 (2019), pp. 569–578.
- [13] Fadl Moukalled, L Mangani, Marwan Darwish et al. **The finite volume method in computational fluid dynamics**. Vol. 113. Springer, 2016.
- [14] Timo Oksanen. “Controlling air flow in recirculating mixed flow batch dryer with double bed mode”. Em: **Computers and Electronics in Agriculture** 149 (2018), pp. 133–138.
- [15] H Scaar et al. “Experimental and numerical study of the airflow distribution in mixed-flow grain dryers”. Em: **Drying Technology** 34.5 (2016), pp. 595–607.
- [16] Kael Barreto e Souza e Manuel Osorio Binelo. “ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS KHATCHATOURIAN E DARCY-FORCHHEIMER DO FLUXO DE AR EM ARMAZÉNS GRANELEIROS”. Em: **Salão do Conhecimento** 6.6 (2020).
- [17] RGM Van der Sman. “Prediction of airflow through a vented box by the Darcy–Forchheimer equation”. Em: **Journal of Food Engineering** 55.1 (2002), pp. 49–57.
- [18] Anderson Rodrigo VISCONCINI, Cid Marcos Gonçalves ANDRADE e Alexandre Marconi de Souza COSTA. “MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS CONTORNOS DE VELOCIDADE DO AR EM UM SECADOR INDUSTRIAL DO TIPO TORRE DE FLUXO MISTO”. Em: (2019).
- [19] Cheng-An Wang et al. “Development of RTE solver for radiative transfer in absorbing-emitting medium using finite volume based CFD library OpenFOAM”. Em: **International Journal of Thermal Sciences** 140 (2019), pp. 36–42.
- [20] F Weigler, H Scaar e J Mellmann. “Investigation of particle and air flows in a mixed-flow dryer”. Em: **Drying Technology** 30.15 (2012), pp. 1730–1741.
- [21] Fabian Weigler et al. “Process optimization of mixed flow dryers for drying agricultural crops.” Em: **Landtechnik** 73.6 (2018), pp. 204–214.