

**Predição de escoamento de ar em um secador tipo túnel: Avaliação do uso de placas de direcionamento de fluxo e de modelos de turbulência****Prediction of air flow in a tunnel type dryer: Evaluation of the use of plates direction of flow and turbulence models**

DOI:10.34117/bjdv6n10-640

Recebimento dos originais: 28/09/2020

Aceitação para publicação: 28/10/2020

**Paula Giarolla Silveira**

Mestranda em Ciência dos Alimentos  
Universidade Federal de Lavras- UFLA  
E-mail: pagiarolla@gmail.com

**Jefferson Luiz Gomes Corrêa**

Professor Titular  
Universidade Federal de Lavras- UFLA  
E-mail: jefferson@dca.ufla.br

**Roney Alves da Rocha**

Professor Adjunto  
Universidade Federal de Lavras- UFLA  
E-mail: roney.rocha@ufla.br

**Gustavo Pathelly Damasceno**

Mestre em Ciência dos Alimentos  
Universidade Federal de Lavras- UFLA  
E-mail: gutrunks@yahoo.com.br

**Ronaldo Elias de Mello Júnior**

Doutorando em Ciência dos Alimentos  
Universidade Federal de Lavras- UFLA  
E-mail: Ronaldo.mello2@posgrad.ufla.br

**Amanda Umbelina de Souza**

Doutoranda em Ciências dos Alimentos  
Universidade Federal de Lavras- UFLA  
E-mail: amandausouza@hotmail.com

**João Renato de Jesus Junqueira**

Professor Adjunto  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS  
E-mail: joao.junqueira@ufms.br

**Juliana Rodrigues do Carmo**

Doutoranda em Ciência dos Alimentos  
Universidade Federal de Lavras- UFLA  
E-mail: juliana\_docarmo@yahoo.com.br

**RESUMO**

A dinâmica dos fluidos computacional, conhecida como CFD (Computational Fluid Dynamics) utiliza métodos computacionais para simulação de fenômenos de transporte, obtendo assim distribuições de perfis de velocidade, pressão, concentração e temperatura. Este trabalho teve por objetivo a avaliação do uso de placas de direcionamento do escoamento e de modelos de turbulência usualmente reportados na literatura k- $\epsilon$ , BSL, SSG e SST na predição de perfis de velocidade durante o escoamento do ar em um secador convectivo (Eco Engenharia Educacional, MD018, Brasil). O fluxo de escoamento do ar e os campos de velocidade foram determinados com a utilização do pacote comercial Ansys-CFX®. As simulações tridimensionais desenvolvidas envolveram as equações de transporte: conservação de massa, quantidade de movimento e transferência de energia. Foi empregado método numérico de volumes finitos para o cálculo das equações diferenciais parciais. As equações algébricas foram resolvidas pelo algoritmo AMG (Algebraic Multi-Grid), utilizando como critério de convergência soma dos resíduos normalizados inferior a  $1 \times 10^{-6}$  para todas as variáveis. O acoplamento pressão-velocidade foi aproximado através do método trilinear. Considerou-se, nas simulações, regime de escoamento permanente. As condições de contorno foram: velocidade uniforme do ar na entrada do duto de alimentação do ar, pressão estática a 0 Pa na saída do secador e condição de não deslizamento nas paredes do secador. O uso de placas de direcionamento de ar proporcionou maior uniformidade das linhas de corrente. Por não haver alterações significativas entre os perfis de velocidade obtidos com os modelos de turbulência, entendeu-se que o modelo k- $\epsilon$  é o mais adequado por apresentar menor tempo de simulação e ser apto para reprodução do comportamento fenomenológico do ar em escoamento em um secador tipo túnel.

**Palavras-chave:** CFD, secagem, escoamento de ar, alimentos

**ABSTRACT**

The computational fluid dynamics, known as CFD (Computational Fluid Dynamics) uses computational methods to simulate transport phenomena, thus obtaining distributions of speed, pressure, concentration and temperature profiles. This work aimed to evaluate the use of flow direction plates and turbulence models usually reported in the literature k- $\epsilon$ , BSL, SSG and SST in the prediction of speed profiles during air flow in a convective dryer (Eco Educational Engineering, MD018, Brazil). Air flow and velocity fields were determined using the commercial package Ansys-CFX®. The three-dimensional simulations developed involved the transport equations: conservation of mass, amount of movement and energy transfer. A finite volume numerical method was used to calculate partial differential equations. The algebraic equations were solved by the AMG algorithm (Algebraic Multi-Grid), using as a convergence criterion the sum of normalized residues less than  $1 \times 10^{-6}$  for all variables. The pressure-velocity coupling was approximated using the trilinear method. In the simulations, a permanent flow regime was considered. The boundary conditions were: uniform air speed at the entrance of the air supply duct, static pressure at 0 Pa at the exit of the dryer and condition of non-slip on the walls of the dryer. The use of air direction plates provided greater uniformity of the current lines. As there are no significant changes between the velocity profiles obtained with the turbulence models, it was understood that the k- $\epsilon$  model is the most appropriate because it presents a shorter simulation time and is capable of reproducing the phenomenological behavior of the air flowing in a tunnel dryer.

**Keywords:** CFD, drying, air flow, food

## 1 INTRODUÇÃO

A dinâmica dos fluidos computacional conhecida pela sigla CFD (*Computational Fluid Dynamics*) utiliza métodos computacionais para simulação de fenômenos de transferência (momentum, calor e massa). Em uma simulação CFD de escoamento, se está interessado na obtenção de distribuições de velocidade, pressões, concentrações e temperatura (FORTUNA, 2000).

Tanto na natureza quanto em processos industriais os escoamentos dos fluidos podem ser em regime laminar ou turbulento. O escoamento laminar necessita de modelos mais simples para a resolução das equações de Navier-Stokes e conservações de massa e energia. O escoamento turbulento envolve modelos matemáticos mais robustos. Sendo assim, algoritmos específicos como ferramentas inclusas em códigos computacionais, tipo ANSYS CFX<sup>®</sup> tem sido empregado para a resolução das equações das leis de conservação física (DAMASCENO, 2011).

A ferramenta CFD tem auxiliado na simulação de secagem em equipamentos como ciclone (CORRÊA *et al.*, 2004) e secador túnel (LI; ZBICINSKI; WU; 2010), e em processos, como secagem convectiva (CARLESCU *et al.*, 2017) e *spray drier* (SCHMITZ; KULOZIK; FOREST; 2016). Li; Zbicinski; Wu (2010) utilizaram CFD para verificar o *scaling-up* através de dados experimentais obtidos em um secador de laboratório. O presente trabalho teve como objetivo avaliar modelos de turbulência usualmente reportados na literatura ( $\kappa$ - $\epsilon$ ,  $\kappa$   $\omega$  e SST) na predição de perfis de velocidade durante o escoamento do ar em um túnel de secagem.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### SECADOR

O secador utilizado neste trabalho (modelo MD018, Eco Engenharia Educacional, Brasil) consta de um tubo de diâmetro interno 0,2 m, comprimento 2,60 m contendo um porta amostras em formato de disco, com 0,10 m de diâmetro, localizado a 0,25 m da saída de ar para o exterior e 1,95m da entrada de ar aquecido (Figura 1a). O porta amostras é acoplado a uma balança para leitura da variação de massa em experimentos de secagem. O ar ingressa no secador através de um duto perpendicular a ele com diâmetro de 0,102 m. A junção dos dois dutos se encontra a 0,18m da parede final fechada do duto principal do secador. Estão localizadas próximas à entrada de ar três placas em formato de disco que preenchem o diâmetro do secador e apresentam orifícios, conforme a Figura 1b. A distância da entrada do ar para a primeira placa é de 0,15 cm e a distância entre as placas, 0,19 cm.

Figura 1a: Geometria do secador

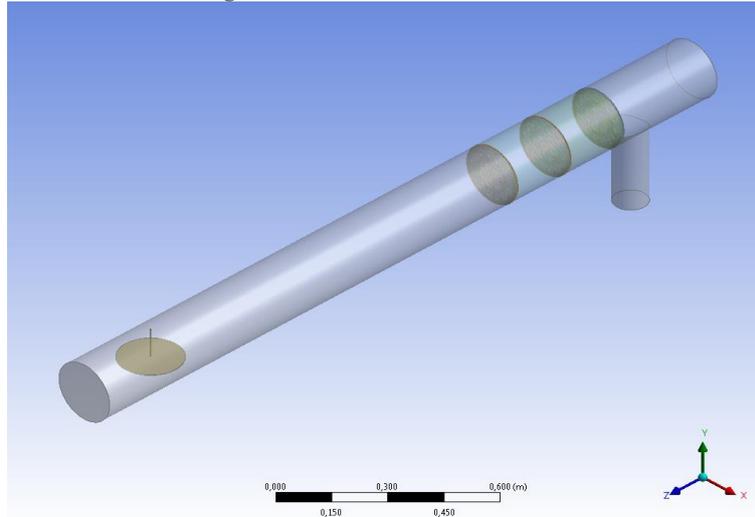
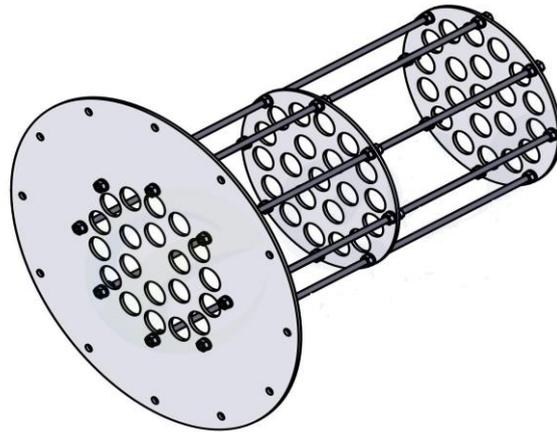


Figura 1b: Placas com orifícios



## MODELAGEM MATEMÁTICA

O escoamento de ar no secador é descrito pelas equações de continuidade (Equação 1) e de momentum (Equação 2).

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \\ \nabla \cdot (\tau + \rho \overline{u' u'}) + \rho g \end{aligned} \quad (2)$$

Em que  $u$  [m/s] corresponde ao vetor da velocidade,  $t$  [s] corresponde ao tempo,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] corresponde à densidade,  $g$  corresponde à aceleração da gravidade,  $\tau$  [Pa] ao tensor da tensão.

A turbulência foi calculada através do modelo de duas equações k- $\epsilon$  (Equações 3 e 4), por oferecer O modelo de turbulência adotado foi o modelo k- $\epsilon$  pois considera-se que o escoamento seja isotrópico e ofereça uma boa relação entre esforço numérico e precisão computacional.

O termo  $k$ , determinado pela Equação 3 representa a energia cinética de turbulência e é definida como a variação das flutuações na velocidade. O  $\epsilon$ , determinado pela Equação 4, é a taxa na qual as flutuações de velocidade se dissipam.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon + P_{kb} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon + C_{\epsilon 1} P_{\epsilon b}) \quad (4)$$

Em que  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] corresponde à densidade,  $\epsilon$  [m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>] é a taxa na qual as flutuações de velocidade se dissipam,  $k$  [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>] representa a energia cinética de turbulência,  $\mu_t$  [kg/m.s] é o termo de viscosidade turbulenta,  $\sigma_k$  é a constante de turbulência para a equação k com valor numérico igual a 1,  $P_k$  [kg/m.s<sup>3</sup>] corresponde ao cisalhamento turbulento,  $P_{\epsilon b}$  e  $P_{kb}$  [kg/m.s<sup>3</sup>] representam as flutuações na turbulência,  $C_{\epsilon 1}$  e  $C_{\epsilon 2}$  são constantes do modelo, com valores numéricos iguais a 1,44 e 1,92 respectivamente,  $\sigma_\epsilon$  é a constante de turbulência para a equação  $\epsilon$  com valor numérico igual a 1,3.

## MÉTODO NUMÉRICO E CONDIÇÕES DE CONTORNO

O método numérico utilizado para o cálculo das equações diferenciais parciais foi o de volumes finitos (PATANKAR, 1980), o controle do modelo dinâmico é global. As equações algébricas são resolvidas pelo algoritmo AMG (Algebraic Multi-Grid).

As equações (1) a (4) foram resolvidas utilizando o critério de convergência de  $10^{-6}$ . O acoplamento pressão-velocidade foi aproximado através do esquema global.

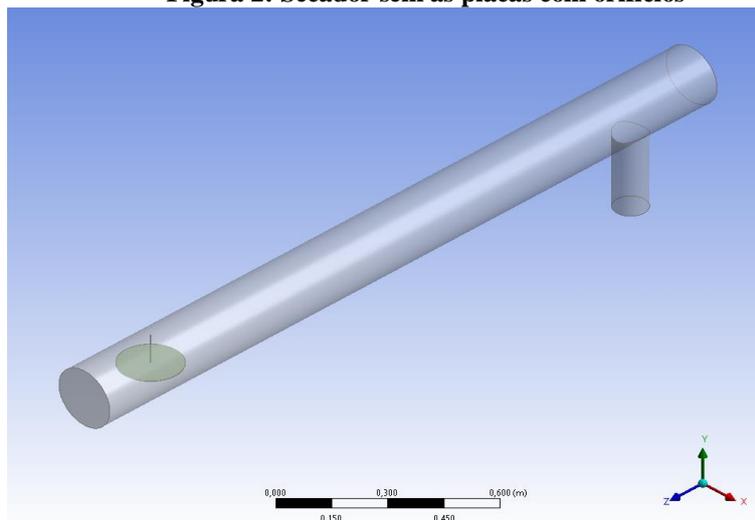
Considerou-se nas simulações regime de escoamento permanente. As condições de contorno foram: velocidade uniforme do ar na entrada do duto de ingresso do ar, pressão estática a 0 Pa na saída do secador e condição de não deslizamento nas paredes do secador.

## GEOMETRIAS

A geometria do secador foi desenvolvida utilizando o Design Modeler, que está incluso no pacote ANSYS CFX® versão 18.0 estudantil.

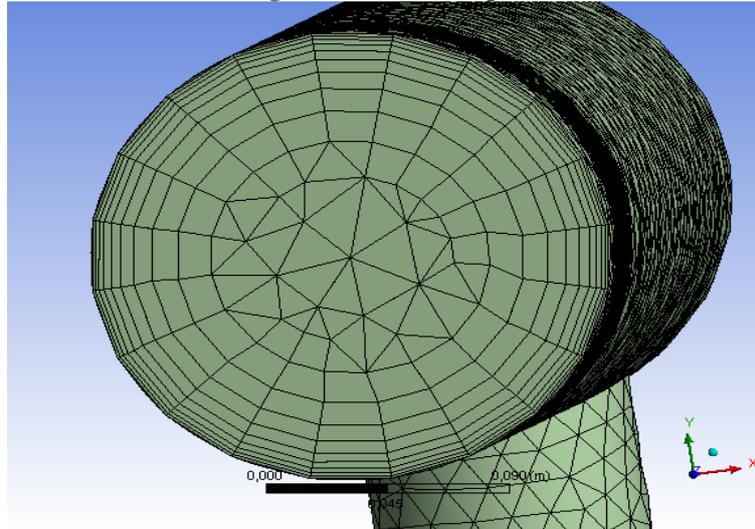
Foram confeccionadas duas geometrias deste secador. A primeira geometria incluiu três placas com orifícios (Figura 1a) e o porta amostra. A segunda geometria era composta pelo túnel sem as placas, porém com o porta amostra (Figura 2).

**Figura 2: Secador sem as placas com orifícios**



As malhas computacionais utilizadas nas simulações foram do tipo hexaédrica com refino próximo a parede do túnel, como demonstrado na Figura 3. Foram utilizados dois refinamentos de malha. No primeiro, a malha apresentava 769089 elementos e 167200 nós e no segundo, 841349 elementos e 193680 nós.

Figura 3: Malha computacional



As simulações foram realizadas considerando-se o escoamento de ar a  $25^{\circ}\text{C}$  com velocidade de  $2\text{ m s}^{-1}$  no duto de entrada do ar.

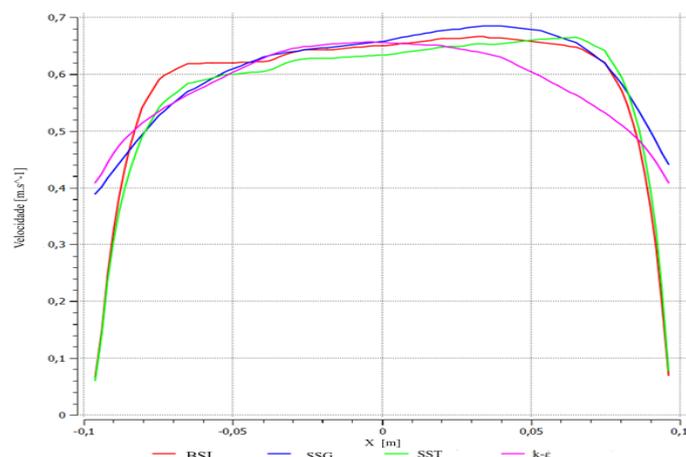
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da simulação numérica obtiveram-se os dados da distribuição de velocidade. Foram obtidos perfis de velocidade do ar com relação ao raio do secador (Figura 4). Nesta figura são descritas duas curvas correspondentes aos perfis de velocidade obtidos ao se simular o secador com e sem as placas com orifícios.

A Figura 4 apresenta perfis de velocidade radial em simulações feitas com modelos de turbulência distintos.

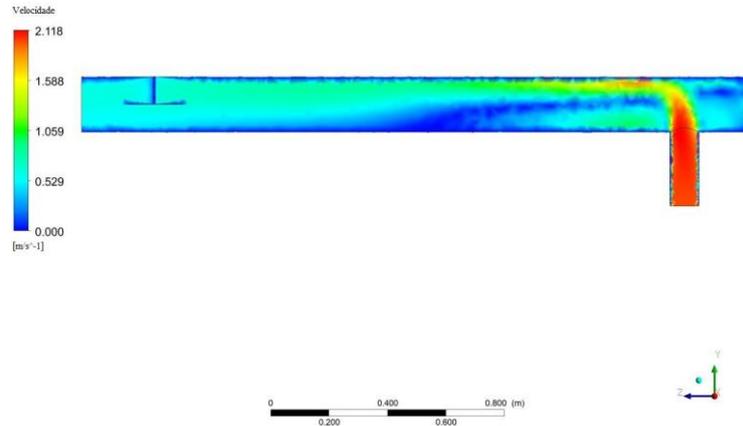
A comparação dos perfis de velocidade radial apresentados na Figura 4 torna possível inferir que o modelo de turbulência que mais se ajustou ao caso estudado foi o modelo k- $\epsilon$

Figura 4: Perfil de velocidade com relação ao raio do secador, eixo x

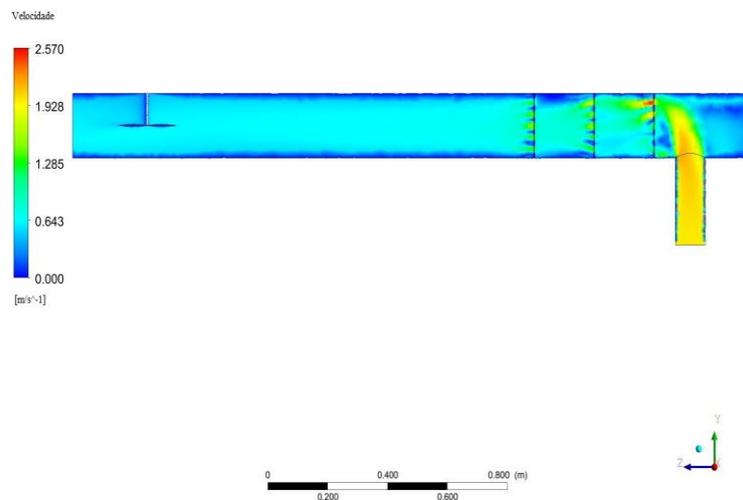


As Figuras 5 e 6 apresentam as linhas de corrente para as simulações sem e com as placas perfuradas. As linhas de corrente na Figura 6 estão bem mais alinhadas que as da figura 5 e com um perfil mais definido e simétrico. Isto reforça a importância destes dispositivos neste tipo de escoamento.

**Figura 5: Linhas de corrente no secador sem a presença de placas perfuradas**



**Figura 6: Linhas de corrente no secador com placas perfuradas**



## 4 CONCLUSÕES

A simulação CFD propiciou uma predição adequada do escoamento de ar em um secador do tipo túnel. Conseguiu retratar a influência de elementos internos ao secador como as placas perfuradas. Observou-se não haver diferença significativa entre os perfis de velocidade para os modelos de turbulência testados, o que indica o uso do modelo k-ε por sua simplicidade e menor tempo de processamento nas simulações.

**NOMENCLATURA**

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$C_{\varepsilon 1}$	Constante do modelo
$C_{\varepsilon 2}$	Constante do modelo
$P_k$	Produção de cisalhamento pela turbulência
$\rho$	Densidade
$\sigma_k$	Constante do modelo
$\sigma_\varepsilon$	Constante do modelo
$P_{kb}, P_{\varepsilon b}$	Representam as flutuações na turbulência
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta

**AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à FAPEMIG, CNPq e CAPES pelo financiamento da pesquisa

**REFERÊNCIAS**

- CARLESCU, P.M.; ARSENOAIA, V.; ROSCA, R. TENU, I. (2017), “CFD simulation of heat and mass transfer during apricots drying”. LWT - Food Science and Technology (in press).
- CORRÊA, J.L.G.; GRAMINHO, D.R.; SILVA, M.A.; NEBRA, S.A. (2004), “The cyclonic dryer - A numerical and experimental analysis of geometry on average particle residence time”. Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 21, p. 103–112.
- DAMASCENO, G.P. (2014), Simulação via CFD para otimização do desempenho operacional de uma câmara frigorífica. PPG-CA/UFLA, Lavras – MG, 61p. (dissertação de mestrado).
- FORTUNA, A.O. (2000), Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações, Edusp, São Paulo,
- LI, X.; ZBICINSKI, I.; WU, J. (2010), “A Scaling-up Approach from Experimental Tunnel to Spray Dryer”. International Journal of Food Engineering , Vol.6, p.1-8.

PATANKAR, S.V. (1980), Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Co. Washington.

SCHMITZ, I.; KULOZIK, U.; FOREST, P.(2016), “Modeling spray drying of dairy products - Impact of drying kinetics, reaction kinetics and spray drying conditions on lysine loss”. Chemical Engineering Science, Vol.141, pp.315.