

APLICAÇÃO DA DINÂMICA DOS FLUIDO COMPUTACIONAL (CFD) NA SIMULAÇÃO DO AR AQUECIDO EM UM SECADOR DE CAMADA FIXA

PAULO C. CORADI¹, ÂNGELO F. C. LEMES²

¹ Eng^o Agrícola, Professor Adjunto III, Universidade Federal de Santa Maria, Campus de Cachoeira do Sul, UFSM-RS, Fone: (0XX51) 3722-3247, paulo.coradi@ufsm.br

² Estudante de Mestrado em Agronomia, UFMS/CPCS-MS

Apresentado no
XLV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2016
24 a 28 de julho de 2016 - Florianópolis - SC, Brasil

RESUMO: Os secadores devem ter alto rendimento e uniformidade na remoção da água da massa de grãos para atingir alta qualidade no produto final. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a utilização da ferramenta computacional CFD (Computational Fluid Dynamics) para simulação da dinâmica do ar aquecido no interior de um secador de grãos. O trabalho de pesquisa foi conduzido no Laboratório de Pós-Colheita de Grãos da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). Para o desenvolvimento da pesquisa utilizou-se um secador de grãos de camada fixa. Para a simulação foram levadas em consideração as características construtivas do secador, o sistema de aquecimento do ar de secagem, as variáveis ambientais, as condições iniciais e de contorno, a adimensionalização do sistema e os parâmetros físicos do fluido. O programa computacional CFD mostrou-se eficiente na representação dinâmica do ar aquecido no interior do secador. O equipamento de secagem atendeu positivamente a dinâmica do ar sob os aspectos de fluxo, distribuição, pressão, velocidade e aquecimento. Desta forma, concluiu-se que a ferramenta computacional CFD pode ser utilizada para avaliar a dinâmica do ar aquecido em secadores de camada fixa.

PALAVRAS-CHAVE: Pós-colheita, Secador, Silo.

APPLICATION OF COMPUTATIONAL FLUIDS DYNAMICS (CFD) IN SIMULATION OF HEATED AIR IN A FIXED LAYER DRYER

ABSTRACT: The dryers must have a high efficiency and uniformity in the removal of water from the grains to achieve high quality of the final product. Thus, the aim of this study was to evaluate the use of CFD software (Computational Fluid Dynamics) for simulating the dynamics of the heated air inside a grain dryer. The research was conducted at the Laboratory of Postharvest Grain of the Federal University of Mato Grosso do Sul (UFMS). For the development of research used a fixed bed of grain dryer. For the simulation were taken into account the constructive characteristics of the dryer, the heating system of the drying air, environmental variables, the initial and boundary conditions, adimensionalization system and the physical parameters of the fluid. The CFD computer program was efficient in the dynamic representation of the heated air inside the dryer. The drying equipment positively answered the dynamics of air under the aspects of flow distribution, pressure, velocity and heating. Thus, it was concluded that the CFD computational tools can be used to evaluate the performance of the fixed bed heated air dryers.

KEYWORDS: Postharvest, Dryer, Silo.

INTRODUÇÃO

A produção de grãos só é alcançada com sucesso se os mesmos forem mantidos com integridade e qualidade até o consumo, o que muitas vezes não acontece principalmente pelas interferências dos processos aplicados nas etapas de pós-colheita (LACERDA FILHO et al., 2000; BORÉM et al., 2008). A secagem é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e estabilidade dos grãos, considerando que a diminuição do conteúdo de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento. No entanto, as taxas elevadas de remoção de água durante a secagem podem afetar a qualidade dos grãos, promovendo modificações na sua estrutura e nos teores dos seus componentes. As taxas de remoção de água geram tensões internas nos grãos que podem ocasionar trincas e micro fissuras, resultando em injúrias mecânicas e diminuição da qualidade do produto. Quanto maior for a velocidade de retirada de água dos grãos, maior será a taxa de remoção de água e conseqüentemente o produto terá maiores danificações mecânicas (ELIAS et al., 2009).

Os métodos de secagem podem ser classificados de diversas formas, quanto à periodicidade no fornecimento de calor ou ainda em relação à movimentação da massa de grãos. Existem diversos modelos de secadores de grãos disponíveis no mercado e vários estudos sendo realizados, buscando melhorias nos equipamentos para aumentar o rendimento e praticidade, sem que haja alteração na qualidade dos grãos. Para isto é fundamental controlar a temperatura e o fluxo de ar, a velocidade e as pressões do ar aquecido no interior do equipamento, a movimentação do produto e a uniformização dos teores de água na massa de grãos (LAHSASNI et al., 2004).

Enquanto isto, observa-se nas diversas regiões a recepção de grãos nas unidades armazenadoras de forma desuniforme sob o aspecto operacional de fluxo, em função das variações dos teores de água e impurezas na massa de grãos. As máquinas de pré-limpeza / limpeza conseguem retirar parcialmente as impurezas e o conjunto de moegas separa os lotes de grãos mais úmidos dos grãos mais secos, minimizando os problemas nas operações seguintes de secagem e armazenamento, no entanto, não são suficientes para diminuir os gargalos dos secadores e as filas de caminhões de transporte de grãos nas entradas das unidades. As uniformidades dos lotes podem garantir uma secagem mais rápida e padronização da qualidade dos grãos.

Considerando os problemas existentes na secagem e no armazenamento de grãos destaca-se a importância de se desenvolver um sistema com alto rendimento operacional, de menor custo agregado que obtenha grãos de alta qualidade. Pressupõe-se que a uniformidade da secagem dos grãos poderia ser aumentada e conseqüentemente o rendimento de secagem se fossem utilizados secadores com mais câmaras de secagem no mesmo equipamento, funcionando simultaneamente nas mesmas condições, desta forma, os lotes de grãos podem ser separados em tipos, faixas de teores de água, teores de impurezas e/ou tamanho dos grãos na secagem.

Para avaliar a fluidodinâmica do ar aquecido no interior do secador foi utilizada uma ferramenta computacional conhecida como CFD (Computational Fluid Dynamics). Esta tecnologia computacional possibilitou estudar a dinâmica de fluxo do ar aquecido no interior da câmara de secagem. O CFD é muito utilizado na simulação de processos, principalmente na indústria química, aerodinâmica, alimentos e aspectos ambientais, podendo ser adaptada para outras situações de engenharia (DAMASCENO et al., 2011). Essa tecnologia tem sido utilizada em processos envolvendo a engenharia na agricultura, como no estudo do conforto térmico em galpões de animais (CORADI et al., 2008), em estudo da difusão de gases (ar, O₃, CO₂) em uma massa de grãos armazenada em silos, em estudo da distribuição da pressão, da temperatura e da velocidade da mistura ar/combustível em fornalhas ou queimadores a gás,

entre outras utilizações. A utilização do CFD possibilita simulações do fluxo, temperatura e pressões do ar no interior do secador para ajustes e otimização do equipamento. O principal benefício desta ferramenta é a rapidez e a fácil visualização do desempenho do projeto, permitindo possíveis mudanças. O CFD processa as informações em três etapas, conhecidas como pré-processamento, processamento (soluções de equações) e pós-processamento.

Para a simulação são levadas em consideração as características construtivas do secador de grãos, o sistema de aquecimento do ar de secagem, as variáveis ambientais controladas, as condições iniciais e de contorno, a adimensionalização do sistema, os parâmetros físicos. Para a simulação da convecção do ar no interior do secador será construído um modelo matemático levando em consideração o tipo de escoamento do ar, as propriedades termo físicas do fluido, a dissipação viscosa no escoamento e o termo de pressão na equação de energia, as superfícies do secador. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a utilização da ferramenta computacional CFD (Computational Fluid Dynamics) para simulação da dinâmica do ar aquecido no interior de um secador de grãos de camada fixa.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Pós-Colheita de Grãos, na área experimental da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Câmpus de Chapadão do Sul (CPCS). O município de Chapadão do Sul está situado no noroeste do estado do Mato Grosso do Sul, localizado a uma latitude 18°47'39" sul e a uma longitude 52°37'22". O município está a uma altitude de 905 m.

O conjunto de equipamentos silo-secador e transportador foi instalado sobre uma cobertura de telhas de zinco com inclinação de 30% e beiral de 0,50 m, fixadas em uma estrutura de aço galvanizado, área total de 20 m². As laterais da estrutura foram construídas em formato semi-fechado, deixando um espaço aberto para circulação do ar de altura de 1,5 m do solo. O piso foi construído de concreto armado.

O secador de grãos foi construído com chapas metálicas de 14", com formato circular e elevado, contendo uma câmara de secagem de 2,0 m de altura e 1 m de diâmetro, com capacidade estática variável conforme tipo de grão (média de 164 kg de grãos de soja e milho). O piso foi dimensionado com 10% de sua área total perfurada. No seu interior foram construídas quatro células de secagem móveis, para residência da massa de grãos durante a secagem, cada uma delas, medindo 1,5 m de altura e 0,20 m de diâmetro, construídas com chapas metálicas 12", com paredes de furos de 2 mm de diâmetro e abertas na parte superior. A função das quatro câmaras de secagem móveis foi a separação dos grãos e/ou sementes em faixas de teores de água, teores de impurezas ou tamanho dos grãos, no intuito de aumentar o rendimento e a qualidade dos grãos e/ou sementes na secagem.

O plenum do secador com função de reduzir a velocidade do ar de secagem foi disposto abaixo da câmara de secagem, com diâmetro de 1,5 m e altura de 0,30 m. No centro do plenum foi instalada uma das resistências elétricas com potência de 4000 watts. A outra resistência elétrica de mesma potência foi fixada em compartimento anterior do plenum, de 1,5 m de comprimento e 0,5 m de altura. Um ventilador centrífugo de pás retas, de vazão de 20 m³ min⁻¹ e pressão estática de 40 mmca, potência de 0,5 cv, tensão de 220 / 380 volts, rotação de 1750 rpm, monofásico, estrutura de aço carbono, rotor em alumínio fundido, ruído 90 DBA, peso de 35 kg foi acoplado a um funil de 1,5 m de comprimento e 0,5 m de altura interligado com o corpo do secador (Figuras 1 e 2).

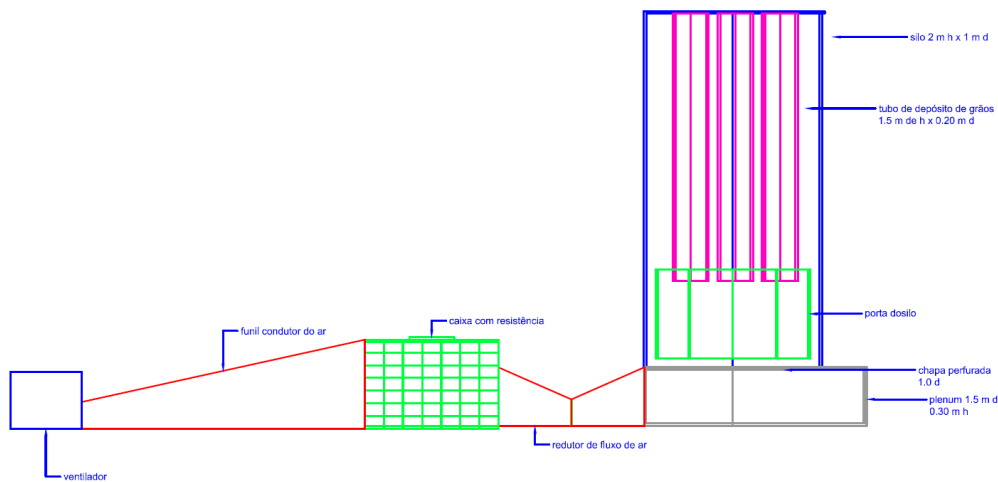


Figura 1. Corte longitudinal do secador de grãos.

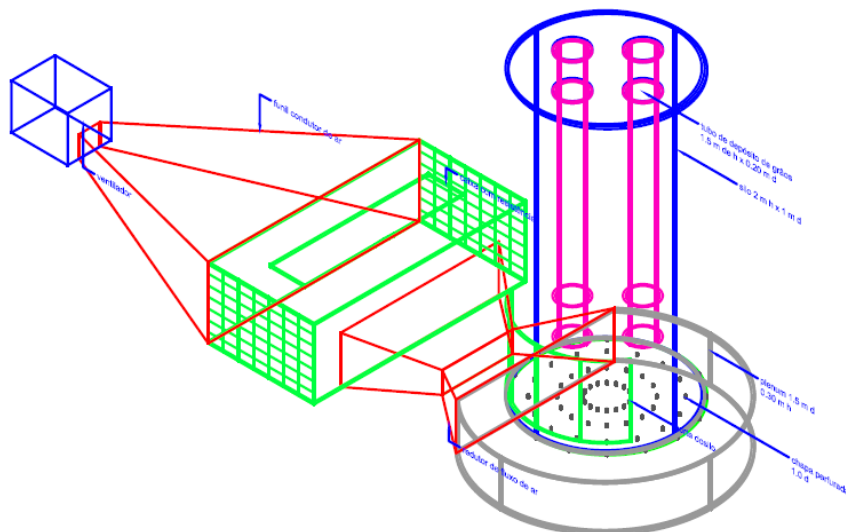


Figura 2. Perspectiva do secador de grãos.

A temperatura do ar de secagem foi controlada diretamente nas resistências elétricas através de um controlador externo com dimensões de (500 x 400 x 250 mm), canaletas com recorte aberto para alojamento dos cabos, disjuntor de proteção para comando 10A e força 40A, fonte chaveada 24 vcc para acionamento do rele de estado sólido, rele de estado 40A sólido trifásico com dissipador de calor, controlador de temperatura N1040-PR para controle do sistema, régua de borne para entrada e saída de cabos de comando e força. As resistências elétricas utilizadas foram do tipo tubular em formato de U, fabricada com tubo de aço inox 304, diâmetro de 11,2 mm, e as aletas em ferro, comprimento total de 1200 mm, 220 volts e 4500 watts.

O problema em estudo caracterizou-se como de convecção com escoamento forçado do ar. A condição inicial de temperatura média ambiente foi de 23 °C. Para as condições de contorno foi considerada uma temperatura de 88, 98 e 108 °C na parede abaixo, na entrada do ar aquecido, lado sul da geometria e fluxo de calor igual à zero, nas condições de simetria para o mesmo lado. No lado leste, oeste e norte consideraram-se como parede isolada e fluxo de calor igual a zero. Considerando que a geometria do sistema se apresentava com grandes dimensões, interferindo na convergência das células convectivas de aquecimento do ar no interior do galpão, a adimensionalização tornou-se uma alternativa necessária para a

simulação. Para isto, consideraram-se as seguintes situações, para comprimento (L) da seção (secador) = 1:

- Temperatura inicial (T_1) 96,91 °C = 1 e temperatura final (T_2) 88,42 °C = 0
- Temperatura inicial (T_1) 106,93 °C = 1 e temperatura final (T_2) 98,44 °C = 0
- Temperatura inicial (T_1) 116,96 °C = 1 e temperatura final (T_2) 108,46 °C = 0

Para a simulação do ar estabeleceram-se os seguintes parâmetros físicos personalizados: $\rho = 1 \text{ kg m}^{-3}$; $c_p = 0,72 \text{ J kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$; $k = 0,1 \text{ W m}^{-1} \text{ °C}^{-1}$; $\mu = 0,1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$; $\beta = 13,88 \text{ 1 K}^{-1}$; $q = 0 \text{ W m}^{-3}$; $g = 10 \text{ m s}^{-2}$, em que: (ρ) massa específica, (c_p) calor específico, (k) condutividade elétrica, (μ) viscosidade, (q) fluxo de calor, (β) coeficiente de expansão térmica.

O coeficiente de expansão volumétrica foi calculado em função do Número de Rayleigh ($Ra_{a,L}$), pela equação (1), sendo que a sua convergência ocorreu quando ($1708 < Ra_{a,L} < 5 \times 10^5$). Assim, adotou-se ($Ra_{a,L}$) = 10^4 , resultando em $\beta = 13,88 \text{ (1/k)}$, que permitiu a convergência e uma melhor distribuição de temperatura, pressão, velocidade e fluxo de calor, equação 1:

$$R_{a,L} = \frac{g \beta (T_1 - T_2) L^3}{\alpha \mu} \quad (1)$$

em que: (T_1) temperatura inicial, (T_2) temperatura final, (α) coeficiente de difusividade térmica, (L) comprimento da seção, ($Ra_{a,L}$) Rayleigh. O coeficiente de difusividade térmica foi determinado pela equação 2:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2)$$

A solução do problema de convecção em qualquer cavidade nada mais é do que a solução das equações de Navier Stokes, nas quais as forças de empuxo associadas às variações de massa específica são responsáveis pela movimentação do fluido. Nesse trabalho foram feitas as seguintes considerações para o desenvolvimento do modelo matemático: o escoamento foi considerado laminar, transiente e bidimensional; as propriedades termofísicas do fluido de trabalho foram consideradas personalizadas, exceto o coeficiente de expansão volumétrica, cuja variação origina do Número de Rayleigh; foi desprezada a dissipação viscosa no escoamento e o termo de pressão na equação de energia; todas as superfícies do galpão foram consideradas perfeitamente isoladas, menos na parede da tubulação de aquecimento e a parede de saída do ar, em que existiu temperatura de aquecimento e resfriamento, respectivamente. As equações 3, 4 e 5 caracterizam o escoamento:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Equação da quantidade de movimento na direção x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \beta (T - T^r) \vec{g} \cdot \vec{i} \quad (4)$$

Equação da quantidade de movimento na direção y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \beta (T - T^r) \vec{g} \cdot \vec{j} \quad (5)$$

sendo que: (u) velocidade na direção (x) em m s^{-1} , (v) velocidade na direção (y) em m s^{-1} , (x) coordenada na direção horizontal em m, (y) coordenada na direção vertical em m, (p) massa específica em kg m^{-3} , (δ) gradiente, (β) coeficiente de expansão volumétrica, (T) temperatura em °C, (i) vetor unitário na direção x, (j) vetor unitário na direção y.

A equação 6 representa a conservação de energia no sistema:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

sendo que: (α) difusividade térmica em $m^2 s^{-1}$.

A Figura 3 representa o escoamento do ar convectivo e a distribuição do calor no interior do secador.

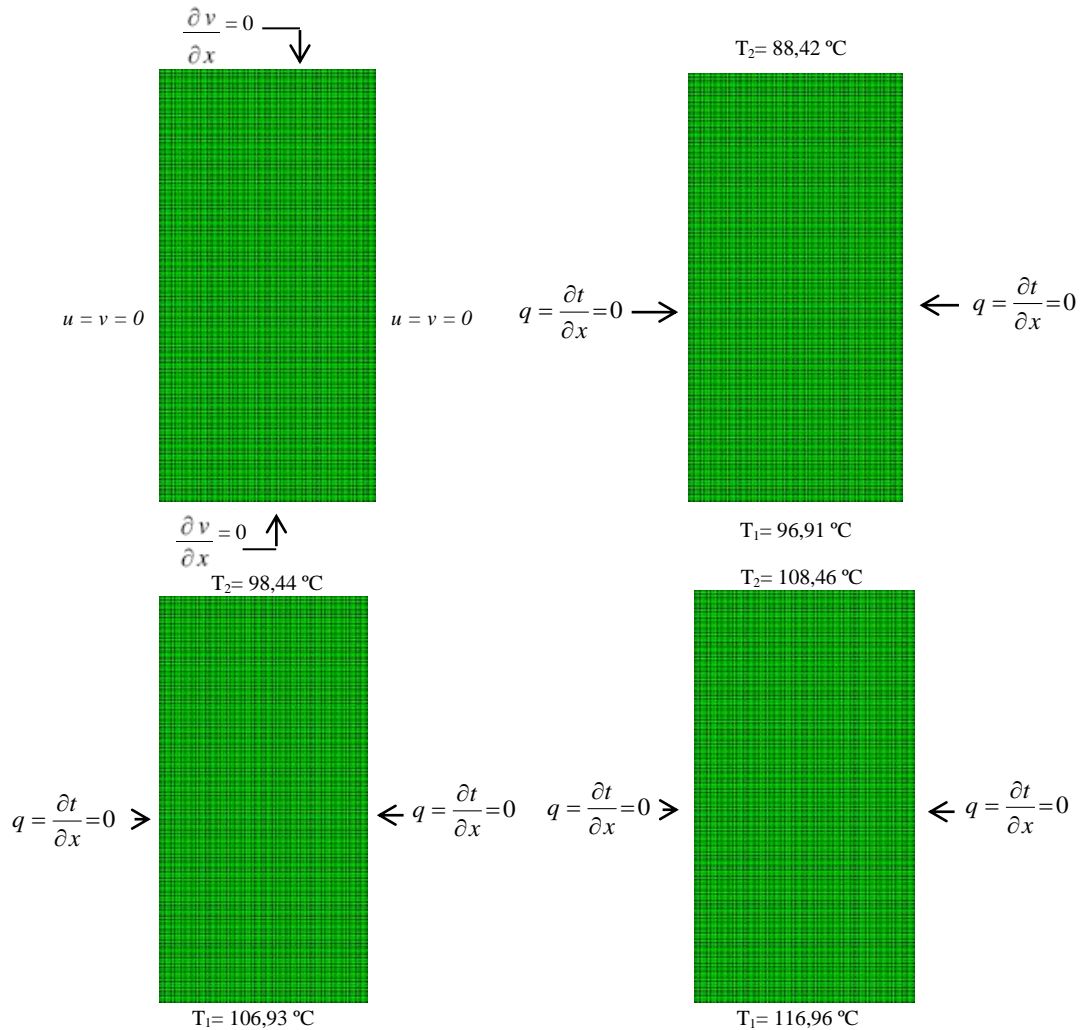


Figura 3. Escoamento convectivo do ar e distribuição do fluxo de calor no interior do secador.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 4, 5 e 6 estão as simulações (temperatura, velocidade, pressão, fluxo de calor e linha de corrente) do ar aquecido no interior do secador de grãos para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C. Verificou-se nos parâmetros avaliados que houve uma distribuição uniforme do ar aquecido a partir da base da câmara de secagem, em camadas definidas de aquecimento e circulação do ar no interior do secador. Na entrada do ar aquecido (base do secador), verificou-se os maiores valores dos parâmetros avaliados, exceto para as linhas de corrente do ar. Para a variável temperatura do ar, constatou-se uma variação de 8,5 °C a partir da entrada do ar no secador até a saída. A regulagem da temperatura no quadro de comando do secador para 30 °C apresentou uma variação de aquecimento do ar de 96,91 °C (entrada) para 88,42 °C (saída) (Figura 4a) ao final do percurso no interior do secador. No entanto, quando a temperatura foi regulada para 40 °C, obteve-se um aquecimento do ar de 106,93 (entrada) para 98,44 °C (saída) (Figura 5a), enquanto que, na temperatura controlada de 50 °C o ar atingiu um aquecimento de 116,96 (entrada) para 108,46 °C (saída) (Figura 6a). O parâmetro

velocidade do ar, Figuras 4b, 5b e 6b, teve variações semelhantes para todas as temperaturas, com valores iniciais 0,65 na entrada do ar até 0,00 m s⁻¹ na saída do ar da câmara de secagem. Bakker-Arkema et al. (1978) recomendou no início do processo de secagem insuflar ar à temperatura ambiente à velocidade de 0,25 a 0,27 m s⁻¹ na massa. Segundo ainda o autor, o aumento dessa velocidade pode causar trincas e quebra nos grãos.

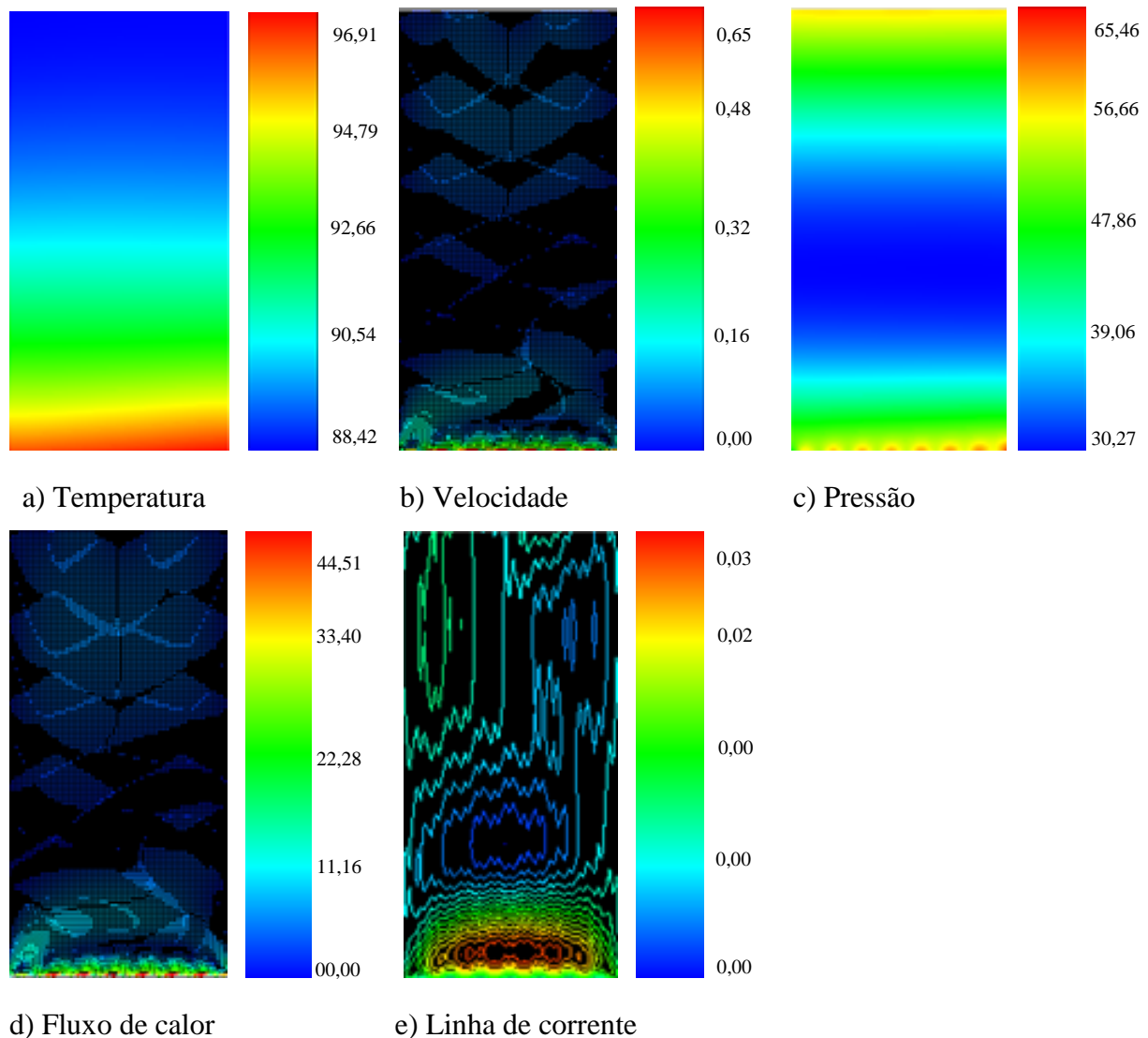


Figura 4. Simulações do ar aquecido no interior do secador para uma temperatura de 30 °C.

O modo como se processa a secagem em camada fixa origina gradientes de temperatura e de umidade na massa de grãos (BROOKER et al., 1974). Segundo os autores em um secador estacionário com distribuição radial de ar, sob temperatura de 40 °C, não observou diferenças entre as temperaturas de grãos mais próximas ao tubo central e as afastadas. Contrariamente, em soja, constatou gradientes de até 15 °C em secadores similares. O gradiente do teor de água, entre grãos diferentemente distanciadas em relação à zona de entrada do ar, depende da umidade relativa, da temperatura, do fluxo do ar, do teor de água, da espessura da massa e da capacidade de transferência de água dos grãos para o ar. Esse gradiente é reduzido com diminuições na temperatura e na espessura da massa de sementes e elevação do fluxo de ar. Nas camadas mais distantes da entrada do ar, pode ocorrer aumento do teor de água dos grãos em consequência da condensação provocada pela passagem do ar

úmido por camadas com temperatura mais baixa (BROOKER et al., 1974; DALPASQUALE et al., 2007).

As relações entre o volume de ar que atravessa a massa do produto, a resistência oferecida à passagem do ar e a altura da camada do produto, acima do sistema de distribuição, são importantes no projeto, seleção e operação de equipamentos de movimentação de ar. Nas Figuras 4c, 5c e 6c estão os resultados de pressão dinâmica do ar no interior do secador. A variação da pressão foi de 35,19 Pa, sendo que, a pressão do ar diminuiu no terço médio do equipamento e teve um aumento no terço superior, aproximando-se da pressão inicial verificada no primeiro terço do equipamento. Observou-se, que não houve diferença entre as temperaturas de aquecimento do ar, sendo que a pressão do ar na saída do secador foi maior (65,46 Pa), enquanto que no terço mediano da câmara de secagem a pressão do ar foi menor (30,27 Pa). A distribuição das linhas de corrente do ar ocorreu acima da entrada do secador. No entanto, as linhas de corrente do ar apresentaram comportamento idênticos e valores semelhantes para todas as temperaturas testadas (Figuras 4e, 5e e 6e). As maiores correntes de ar foram obtidas no terço superior do secador, ao lado esquerdo do equipamento. Uma redução da corrente de ar foi observada no terço mediano do equipamento. Para a temperatura de aquecimento do ar de 30 °C as linhas de correntes foram maiores (0,03 a 0,00 m s⁻¹), enquanto que, nas demais temperaturas foi de 0,02 até 0,00 m s⁻¹.

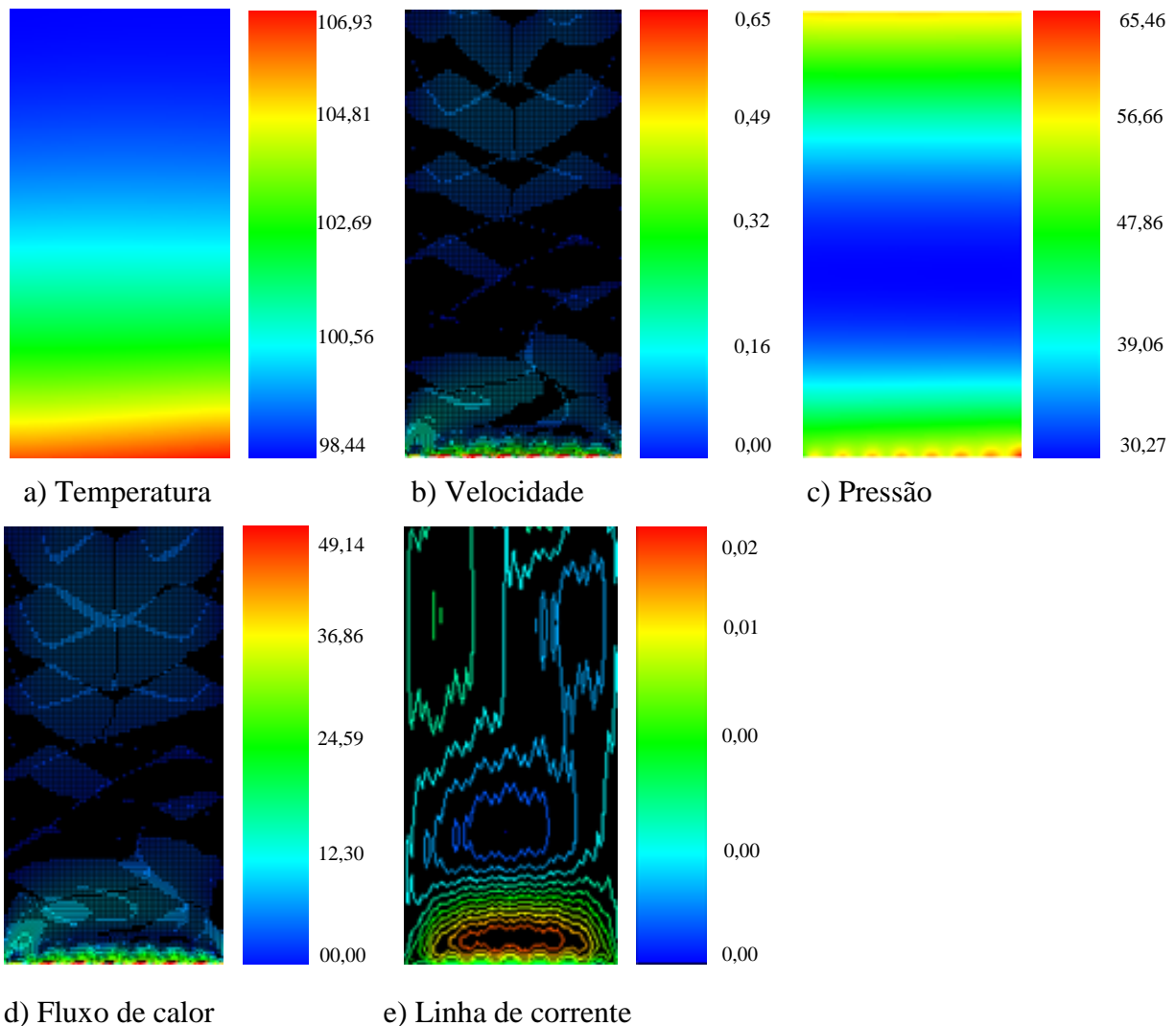


Figura 5. Simulações do ar aquecido no interior do secador para uma temperatura de 40 °C.

Nas Figuras 4d, 5d e 6d, verificou-se que o fluxo de calor no interior do secador foi maior na entrada da câmara de secagem, diminuindo ao longo do percurso até zero, porém em quantidades iniciais diferentes para cada uma das temperaturas. Para o ar aquecido a 30 °C (Figura 4d), o fluxo de ar foi de $44,51 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$, para a temperatura de 40 °C (Figura 5d), o fluxo de ar foi de $49,14 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$, enquanto que para a temperatura do ar de 50 °C (Figura 6d) o fluxo de ar foi $53,77 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Segundo Dalpasquale et al. (2007), o fluxo de ar deve ser suficiente para não ficar saturado antes de deixar a massa de sementes, podendo ser aumentado enquanto seja capaz de absorver toda a água liberada pelos grãos. A partir deste ponto, a migração hídrica, do interior para a superfície de cada grão, torna-se o principal fator a influenciar a velocidade de secagem. Brooker et al. (1974) ressaltaram que temperaturas da massa de grãos situadas entre 40,5 °C e 43,3 °C são consideradas como máximas, e acima delas podem ser gerados danos físicos ou químicos. No entanto, a diferença entre a temperatura do ar insuflado e a da massa de grãos depende do tipo de secador, da espécie botânica considerada, e da resistência ao movimento do ar, tornando-se necessário conhecer o comportamento do calor em cada tipo de secador e em cada espécie. Segundo Dalpasquale (2007), grãos mais úmidos são mais suscetíveis aos danos térmicos, razão pela qual sugeriu que, quanto maior o teor de água, menor deve ser a temperatura empregada.

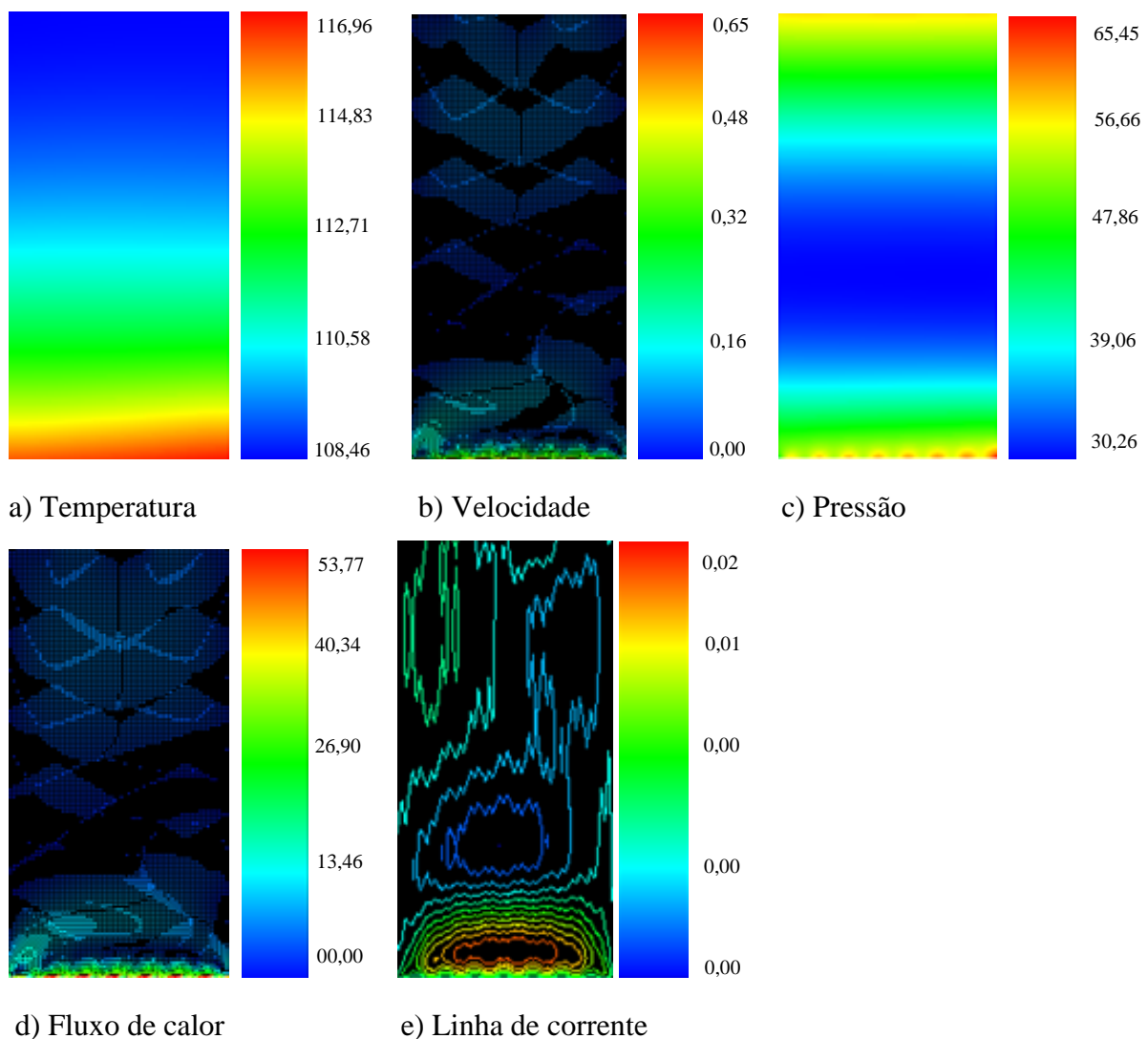


Figura 6. Simulações do ar aquecido no interior do secador para uma temperatura de 50 °C.

Porém, Dalpasquale et al. (2007) ponderaram que a água superficial pode ser retirada sob alta temperatura do ar, uma vez que o processo de evaporação remove calor suficientemente, não alterando a temperatura dos grãos. Abaixo de 30% de água, no entanto, a quantidade de água, para evaporação fica menos disponível.

CONCLUSÕES

O programa computacional CFD mostrou-se eficiente na representação dinâmica do ar aquecido no interior do secador. O equipamento de secagem atendeu positivamente a dinâmica do ar sob os aspectos de fluxo, distribuição, pressão, velocidade e aquecimento. Desta forma, concluiu-se que a ferramenta computacional CFD pode ser utilizada para avaliar a dinâmica do ar aquecido em secadores de camada fixa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFSM, UFMS, FUNDECT e CNPq pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKKER-ARKEMA, F. W.; BROOK, R. C.; LEREW, L. E. Cereal grain drying. In: POMERANZ, Y. (Ed.). **Advances in Cereal Science and Technology**. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, 1978, v. 2, p. 1-45.
- BOREM, F. M.; CORADI, P. C.; SAATH, R.; OLIVEIRA, J. A. Qualidade do café natural e despolpado após secagem em terreiro e com altas temperaturas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 1609-1615, 2008.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Cereal grain drying**. Westport: AVI, 1974. 398 p.
- CORADI, P. C.; COSTA, D. R. da; VISSER, E. M.; MARTINS, M. A. **The use of Computational Fluid Dynamics (CFD) for study of convective air heating in a broiler house**. In: International Conference of Agricultural Engineering, XXXVII Brazilian Congress of Agricultural Engineering and International Livestock Environment Symposium - ILES VIII, 2008.
- DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D. Simulação de secagem de milho em altas temperaturas em camadas fixas sob efeito de entalpia constante, usando modelo de Thompson. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 32, p. 27-36, 2007.
- DAMASCENO, F. A.; BAÊTA, F. C.; MARTINS, M. A.; OSÓRIO, J. A.; TINOCO, I. F. F. Computational fluid dynamics (CFD) and it's use for analysis gas distribution inside animal production facilities: a literature review. **Revista U.D.C.A Atualidade y Divulgação Científica**, v. 14, p. 83-93, 2011.
- ELIAS, M. C. GUTKOSKI, L. C.; OLIVEIRA, M.; MAZZUTTI, S.; DIAS, A. R. G. Umidade de colheita, métodos de secagem e tempo de armazenamento na qualidade tecnológica de grãos de trigo (cv. 'Embrapa 16'). **Ciência Rural**, v. 39, p. 10-21, 2009.
- LACERDA FILHO, A. F.; SOUZA, S. J.; RESENDE, R. C. Estruturas para armazenagem de grãos. In: SILVA, J. S. (Org.). **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 1 ed. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, p. 325-344, 2000.
- LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J. T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). **Journal of Food Engineering**, n. 61, n. 2, p. 173-179, 2004.