

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia

Estêvão Lannes Tolentino

**Análise energética e exérgica da secagem de grãos de milho em leito fixo
utilizando o Método de Volumes Finitos**

Belo Horizonte

2018

Estêvão Lannes Tolentino

**Análise energética e exergetica da secagem de grãos de milho em leito fixo utilizando o
Método de Volumes Finitos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia, em associação ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del-Rei, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia.

Orientador: Prof^o. Dr^o. José Leôncio Fonseca de Souza

Belo Horizonte

2018

T649a Tolentino, Estêvão Lannes
Análise energética e exérgica da secagem de grãos de milho em leito fixo utilizando o método de volumes finitos. / Estêvão Lannes Tolentino. -- Belo Horizonte, 2018.
117f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia em associação ampla com a Universidade Federal de São João Del Rei, 2018.
Orientador: Prof. Dr. José Leôncio Fonseca de Souza

Bibliografia

1. Termodinâmica. 2. Energia – Exérgia – Avaliação. 3. Milho – Secagem. I. Souza, José Leôncio Fonseca de. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 621.4021

Estêvão Lannes Tolentino

**Análise energética e exérgica da secagem de grãos de milho em leito fixo utilizando o
Método de Volumes Finitos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia, em associação ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del-Rei, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia.

Aprovado em ____ de _____ de ____.

Banca Examinadora

Profº. Drº. _____
José Leôncio Fonseca de Souza (CEFET-MG)

Profº. Drº. _____
Paulo Eduardo Lopes Barbieri (CEFET-MG)

Profº. Drº. _____
Rafael Pinheiro Amantéa (IETEC)

AGRADECIMENTOS

O trabalho até aqui foi árduo, mas foi realizado com muito empenho, dedicação e sede pelo conhecimento. Se até aqui cheguei, muito disto se deve a pessoas especiais que estão presentes ou que já passaram pela minha vida.

Primeiramente, agradeço a Deus, que sempre iluminou meu caminho durante minha jornada, por me dar forças e saúde para superar as dificuldades e por ser o maior mestre que alguém pode conhecer. Sem Ele, nada disso seria possível.

Ao meu orientador José Leôncio, pela dedicação, confiança, apoio e pela vontade de ajudar e de realizar um trabalho de pesquisa de qualidade.

Aos professores Frederico Romagnoli, Paulo Barbieri e Rafael Amantéa, por terem aceitado o convite de participar da banca examinadora.

Aos demais professores, pelo apoio e pelo grande serviço prestado.

À minha família, pelo apoio incondicional, e em especial aos meus pais José Carlos e Áurea, que não mediram esforços para que eu chegasse até aqui, e aos meus irmãos Mateus e Sofia, por estarem sempre presentes na minha vida.

À minha esposa Bárbara, pelo carinho, companheirismo e apoio.

Aos meus sogros, Ronan e Odete, e cunhados, Ronan Júnior e Renan, pelo carinho que sempre tiveram comigo.

Ao CEFET-MG, por ter aberto suas portas para mim e por ter me proporcionado um estudo de qualidade durante minha graduação e mestrado.

À CAPES, pelo apoio financeiro em prol do desenvolvimento da pesquisa.

Aos funcionários Aline, Caio e Marcos, pela presteza e pelo ótimo serviço prestado.

Aos colegas de mestrado e doutorado, em especial Geovane, André, Leonardo, Vinícius e Tiago, pelos bons momentos vividos, pelo compartilhamento das mesmas dificuldades e pelo apoio mútuo.

Aos demais amigos que colaboraram de alguma forma e que vão continuar presentes na minha vida com certeza, o meu muito obrigado.

RESUMO

O processo de secagem de grãos é de grande importância para o meio agrícola por gerar melhorias na colheita, redução da perda de produto e por garantir melhor qualidade e conservação dos alimentos, porém é responsável por grande parte do consumo de energia gasta na produção e armazenamento dos grãos. Assim, torna-se relevante o estudo dos secadores de grãos na busca por um uso mais eficiente dos recursos energéticos. Este trabalho visou à elaboração e validação com dados presentes na literatura de um modelo numérico bidimensional de secagem de grãos de milho em leito fixo e camada espessa baseado em uma série de Equações Diferenciais Parciais, a fim de se compreender o comportamento da secagem. O modelo foi solucionado utilizando o Método de Volumes Finitos com auxílio do software *ANSYS Fluent 18.0*. A ferramenta adicional *User-Defined Function* foi utilizada para personalizar o software, permitindo a inserção de um modelo de secagem mais completo, através da programação em linguagem C. Após validação do modelo, foi feito um estudo energético e exergético para dois secadores diferentes, um com escoamento de ar unidimensional e outro com escoamento de ar bidimensional, através da avaliação do comportamento das eficiências energética e exergética, tanto média quanto de pico, para diferentes parâmetros de secagem. Como resultados, mostrou-se que menores vazões mássicas de ar na entrada, decorrentes de menores velocidades ou pressões na entrada, produziram maiores eficiências (média e de pico), tanto de energia quanto de exergia. Constatou-se também que menores temperaturas do ar de entrada geraram maiores picos de eficiências energéticas e menores eficiências energéticas médias, porém maiores temperaturas do ar de secagem forneceram maiores eficiências exergéticas. Ainda verificou-se que menores umidades relativas do ar de entrada produziram maiores eficiências energéticas (média e de pico), enquanto maiores eficiências exergéticas foram obtidas por valores de umidade absoluta do ar de secagem mais próximos da umidade absoluta do estado morto de referência.

Palavras-chave: Secagem de milho; Secadores de grãos de leito fixo e camada espessa; Simulação Numérica; Método de Volumes Finitos; Análise energética e exergética.

ABSTRACT

The grain drying process is very important for agriculture because it leads to improvements in the harvesting, reduces product loss and guarantees better quality and conservation of food, but it is responsible for much of the energy consumption spent on the grains' production and storage. Thus, it's relevant the study of grain dryers on search for a more efficient use of energy resources. The objective of the work was to elaborate and validate with literature's data a two-dimensional numerical model of fixed and deep bed corn grains drying based on partial differential equations, in order to understand the drying behavior. The model was solved using the Finite Volume Method through ANSYS Fluent 18.0 software. The additional tool User-Defined Function was used to customize the software, allowing the inclusion of a more complete drying model through programming in C language. After model's validation, an energy and exergy study was performed for two different dryers with one and two-dimensional air flow, through the evaluation of energy and exergy efficiencies behaviour, both average and peak, for different drying parameters. As results, it was shown that lower inlet air mass flow rates due to lower velocities or pressures at dryer inlet produced higher energy and exergy efficiencies (average and peak). It was also observed that lower inlet air temperatures generated higher energy efficiency peaks and lower average energy efficiencies, but higher drying air temperatures provided higher exergy efficiencies. It could also be concluded that lower relative humidity of the inlet air produced higher energy efficiencies (average and peak), while higher exergy efficiencies were obtained by absolute humidity values of drying air closer to the absolute humidity of the reference dead state.

Keywords: Corn drying; Deep and fixed bed grain dryers; Numerical simulation; Finite Volume Method; Energy and exergy analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Exemplo de secador de grãos em leito fixo com ventilação forçada.	15
Figura 2. Volume de controle diferencial.	36
Figura 3. Esquema de uma célula bidimensional.	54
Figura 4. Procedimento de solução do modelo matemático.	63
Figura 5. Geometria do secador com escoamento de ar unidimensional.	64
Figura 6. Malha computacional do secador com escoamento de ar unidimensional.	65
Figura 7. Teor de umidade do leito de grãos M em função do comprimento do secador.	68
Figura 8. Temperatura do leito de grãos θ em função do comprimento do secador.	69
Figura 9. Teor de umidade médio do leito de grãos M em função do tempo t	69
Figura 10. Teor de umidade do leito de grãos (a) e umidade absoluta do ar (b) em função do comprimento do secador.	72
Figura 11. Temperatura do ar (a) e temperatura do leito de grãos (b) em função do comprimento do secador.	73
Figura 12. Umidade relativa do ar em função do comprimento do secador.	73
Figura 13. Taxa de transferência de umidade (a) e taxa de transferência de energia (b) em função do comprimento do secador.	75
Figura 14. Gradiente de pressão (a) e linhas de corrente (b) ao longo do secador.	76
Figura 15. Teor de umidade do leito de grãos para: (a) $t=30\text{min}$ e (b) $t=180\text{min}$	76
Figura 16. Temperatura do ar para: (a) $t=30\text{min}$ e (b) $t=180\text{min}$	76
Figura 17. Temperatura do leito de grãos para: (a) $t=30\text{min}$ e (b) $t=180\text{min}$	77
Figura 18. Umidade absoluta do ar para: (a) $t=30\text{min}$ e (b) $t=180\text{min}$	77
Figura 19. Umidade relativa do ar para: (a) $t=30\text{min}$ e (b) $t=180\text{min}$	77
Figura 20. Geometria do secador com escoamento de ar bidimensional (a) e malha computacional discretizada (b).	78
Figura 21. Teor de umidade médio do leito de grãos M em função do tempo t	80
Figura 22. Gradiente de pressão (a), linhas de corrente (b) e campo de velocidades (c) ao longo do secador.	81
Figura 23. Teor de umidade do leito de grãos para: (a) $t=1\text{h}$, (b) $t=3\text{h}$ e (c) $t=9\text{h}$	81
Figura 24. Temperatura do ar para: (a) $t=1\text{h}$, (b) $t=3\text{h}$ e (c) $t=9\text{h}$	82
Figura 25. Temperatura do leito de grãos para: (a) $t=1\text{h}$, (b) $t=3\text{h}$ e (c) $t=9\text{h}$	82
Figura 26. Umidade absoluta do ar para: (a) $t=1\text{h}$, (b) $t=3\text{h}$ e (c) $t=9\text{h}$	83
Figura 27. Umidade relativa do ar para: (a) $t=1\text{h}$, (b) $t=3\text{h}$ e (c) $t=9\text{h}$	83
Figura 28. Efeito da velocidade do ar na entrada do secador nas eficiências energética e exergetica (modelo 1D). Parâmetros fixos: $T_{in}=364,1\text{K}$ e $RH_{in}=0,55$	89

Figura 29. Efeito da pressão do ar na entrada do secador nas eficiências energética e exergética (modelo 2D). Parâmetros fixos: $T_{in}=343,15\text{K}$ e $RH_{in}=0,55$	89
Figura 30. Efeito da temperatura do ar na entrada do secador nas eficiências energética e exergética (modelo 1D). Parâmetros fixos: $v_{in}=0,65\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $RH_{in}=0,55$	90
Figura 31. Efeito da temperatura do ar na entrada do secador nas eficiências energética e exergética (modelo 2D). Parâmetros fixos: $P_{in}=5000\text{Pa}$ e $RH_{in}=0,55$	91
Figura 32. Efeito da umidade relativa do ar na entrada do secador nas eficiências energética e exergética (modelo 1D). Parâmetros fixos: $T_{in}=364,1\text{K}$ e $v_{in}=0,65\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	92
Figura 33. Efeito da umidade relativa do ar na entrada do secador nas eficiências energética e exergética (modelo 2D). Parâmetros fixos: $T_{in}=343,15\text{K}$ e $P_{in}=5000\text{Pa}$	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Discriminação dos termos das equações de conservação.	60
Tabela 2. Condições iniciais e de contorno do modelo de secagem unidimensional.	64
Tabela 3. Comparação dos resultados numéricos e experimentais.	66
Tabela 4. Comparação do modelo proposto com as simulações numéricas.	70
Tabela 5. Condições iniciais e de contorno do modelo de secagem unidimensional.	72
Tabela 6. Condições iniciais e de contorno do modelo de secagem bidimensional.	79
Tabela 7. Comparação do modelo proposto com as simulações numéricas.	80
Tabela 8. Variação das condições de secagem.	86
Tabela 9. Valores de eficiência energética e exergética (média e pico) para o modelo de escoamento de ar unidimensional.	87
Tabela 10. Valores de eficiência energética e exergética (média e pico) para o modelo de escoamento de ar bidimensional.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASABE	<i>American Society of Agricultural and Biological Engineers</i>
ASAE	<i>American Society of Agricultural Engineers</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DPR%	Desvio Padrão Relativo percentual
EDP	Equações Diferenciais Parciais
ER%	Erro Relativo percentual
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LSPA	Levantamento Sistemático da Produção Agrícola
MDF	Método de Diferenças Finitas
MEF	Método de Elementos Finitos
MVF	Método de Volumes Finitos
VC	Volume de Controle
SC	Superfície de Controle
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
UDF	<i>User-Defined Function</i>
UDM	<i>User-Defined Memory</i>
UDS	<i>User-Defined Scalar</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Área superficial específica do leito de grãos [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$]
A	Área [m^2]
A	Coefficiente de linearização, coeficiente da equação de secagem
\vec{A}	Vetor área [m^2]
B	Coefficiente de linearização, coeficiente da equação de secagem
c	Calor específico [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
C_2	Fator de resistência inercial [m^{-1}]
D	Condutância [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
D_{eff}	Coefficiente efetivo de difusão de umidade para o leito de grãos [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
e	Espessura do leito de grãos [m]
E	Entalpia [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
\dot{E}	Taxa de energia [W]
\dot{E}_x	Taxa de exergia [W]
f	Número de faces de uma célula [-]
F	Taxa de fluxo [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
\vec{g}	Vetor gravidade [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
h	Coefficiente convectivo de transferência de calor [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]
\bar{h}	Entalpia molar parcial [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]
h_{fg}	Calor latente de vaporização da água [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
I	Tensor unitário [-]
k	Condutividade térmica [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
L	Comprimento entre o centro da célula presente e o centro da célula vizinha [m]
\dot{m}	Vazão mássica [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
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 [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto seco}}^{-1}$]
n	Número de volumes de controle (ou células) do domínio [-]
P	Pressão [Pa]
P_{atm}	Pressão atmosférica [Pa]
P_{vs}	Pressão de vapor de saturação [Pa]
Pe	Número de Peclet [-]
r	Fator de relaxamento [-]
r_0	Raio equivalente do grão de milho [m]
R	Constante específica para o grão de milho [$\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$]
R_a	Constante universal dos gases específica para o ar [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
R^2	Coefficiente de determinação [-]
RH	Umidade relativa do ar de secagem [-]
\bar{s}	Entropia molar parcial [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$]
S	Constante específica para o grão de milho [$\text{Pa} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-3}$]
S	Termo fonte
S_c	Parte explícita do termo fonte

$S_{h,a}$	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_p	Parte implícita do termo fonte
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_h	Tempo, em hora [h]
T	Temperatura absoluta do ar de secagem [K]
v	Velocidade [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
\vec{v}	Vetor velocidade [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
V	Volume [m^3]
w	Umidade absoluta do ar, bulbo seco [$\text{kg}_{\text{água}}\cdot\text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$]
y	Fração molar [-]

Letras gregas

α	Permeabilidade do leito de grãos [m^2]
Γ	Coefficiente difusivo [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$]
Δx	Comprimento no eixo cartesiano x [m]
Δy	Comprimento no eixo cartesiano y [m]
ε	Porosidade do leito de grãos [-]
η_e	Eficiência energética [-]
η_{ex}	Eficiência exergética [-]
θ	Temperatura absoluta do leito de grãos [K]
μ	Viscosidade [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
$\bar{\mu}$	Potencial químico molar [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$]
ξ	Resíduo de cada iteração [-]
ρ	Massa específica [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
$\bar{\tau}$	Tensor de tensões de Reynolds [Pa]
ϕ	Variável de interesse
ψ	Exergia específica [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$]
$\bar{\psi}$	Exergia na base molar [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$]

Subscritos e sobrescritos

*	Valor referente à última iteração convergida
0	Valores iniciais (ambiente)
00	Valores de referência (estado morto)
a	Ar

<i>b</i>	Leito de grãos
<i>comp</i>	Valor da simulação numérica de outros autores a fim de comparação
<i>exp</i>	Valor experimental
<i>g</i>	Grão de milho
<i>in</i>	Entrada
<i>man</i>	Pressão manométrica
<i>nb</i>	Célula vizinha
<i>num</i>	Valor da simulação numérica do presente trabalho
<i>P</i>	Célula presente a ser analisada
<i>v</i>	Vapor de água
<i>w</i>	Água
<i>x,y</i>	Direção cartesiana <i>x</i> ou <i>y</i>
<i>x</i>	Direção cartesiana <i>x</i>
<i>y</i>	Direção cartesiana <i>y</i>

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Justificativa	17
1.2. Objetivos	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1. <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD)	20
2.2. Princípios básicos da psicrometria.....	22
2.3. Secagem de grãos.....	23
2.4. Análise energética e exergética de secadores	31
3. METODOLOGIA	34
3.1. Considerações do modelo matemático.....	34
3.2. Conservação de massa para o ar	36
3.3. Equação da quantidade de movimento para o ar	36
3.4. Balanço de umidade para o ar.....	39
3.5. Balanço de umidade para o leito de grãos	42
3.6. Conservação de energia para o ar	43
3.7. Conservação de energia para o leito de grãos.....	46
3.8. Equações de propriedade para o ar e para o milho	48
3.9. Condições iniciais e de contorno	49
3.10. Análise energética e exergética de secagem	50
4. PROCEDIMENTO NUMÉRICO	54
4.1. Discretização e solução do modelo.....	55
4.2. <i>User-Defined Function</i> (UDF).....	60
4.3. Procedimento iterativo	62
5. VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	64
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
6.1. Modelo de escoamento de ar unidimensional.....	68
6.2. Modelo de escoamento de ar bidimensional.....	78
6.3. Análise energética e exergética de secagem	85
7. CONCLUSÕES.....	95
REFERÊNCIAS	97
APÊNDICE A - Procedimentos para configuração da simulação no <i>ANSYS Fluent 18.0</i>	104
APÊNDICE B - Principais macros utilizadas na UDF.....	106
APÊNDICE C - Estrutura completa da UDF escrita em linguagem C	108

1. INTRODUÇÃO

A secagem é um importante processo presente em diversos campos industriais, entre eles nas áreas agrícola, química, farmacêutica, de cerâmica, alimentícia, de papel e celulose, polimérica, têxtil, de processamento mineral e de combustíveis sólidos (por exemplo, biomassa e carvão) (MUJUMDAR, 2014; DINCER; ZAMFIRESCU, 2016).

Na agricultura, 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).

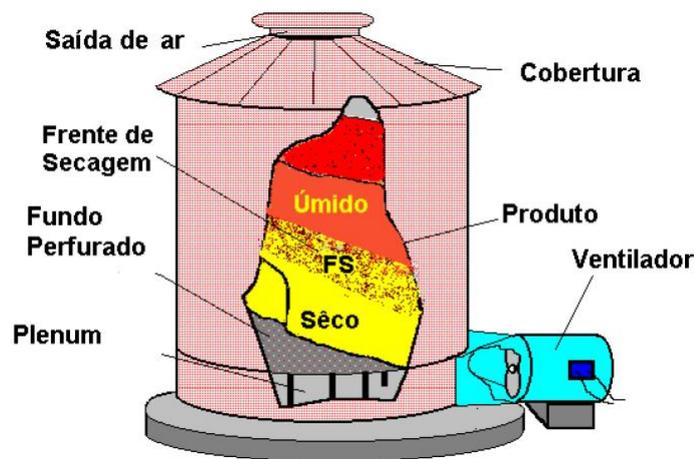
A secagem pode ser tanto natural quanto artificial, dependendo das condições nas quais o ar está sendo utilizado. O processo é natural quando o produto é depositado em um ambiente com uma baixa umidade ou exposto ao sol, permitindo-se assim que ocorra a retirada do excesso de água. Já o método artificial ocorre quando o produto é submetido à ação de uma movimentação forçada de ar quente, obtido através de uma fonte térmica, que transporta calor para o produto a ser desidratado, promove a evaporação da água nele contido e a libera para o ambiente, permitindo uma rápida redução do teor de umidade dos produtos agrícolas (SOUZA, 1996). Esse último processo envolve a utilização de equipamentos e o controle de parâmetros tais como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem.

Segundo Garcia et al. (2004), a secagem em camada estacionária, ou em leito fixo, consiste em forçar um fluxo de ar através de uma camada de produto que permanece estática no interior do secador. Durante a secagem, a retirada da umidade dos grãos é obtida através da movimentação da água pelo processo de capilaridade, decorrente de uma diferença de pressão de vapor d'água entre a superfície do produto a ser secado e o ar que o envolve (BROOKER et al., 1974; SILVA, 2008).

A secagem de grãos em leito fixo processa-se em camadas, com a formação de zonas de secagem, conforme Figura 1. A região onde mais efetivamente verifica-se a transferência de água das sementes para o ar é denominada de frente de secagem (SOUZA, 2013). Na região

anterior à frente de secagem, formada pela massa de grãos já secos, o produto, que apresenta uma temperatura mais elevada, já atingiu o equilíbrio higroscópico com o ar de secagem e este já não ganha nem perde umidade. Na região posterior, têm-se grãos úmidos e baixa temperatura (SILVA et al., 2005).

Figura 1. Exemplo de secador de grãos em leito fixo com ventilação forçada.



Fonte: SILVA, 2008.

A secagem é um antigo processo utilizado pelo homem na conservação de alimentos. Ao se diminuir a quantidade de água (ou teor de umidade) contida nos produtos, cria-se condições adversas para o crescimento de micro-organismos e insetos que podem vir a ser prejudiciais à saúde humana, e ainda se contribui para retardar o processo deteriorativo de sementes, que ocorre devido à atividade metabólica das mesmas (PESKE et al., 2003).

Para Brooker et al. (1974) e Silva (2008) a secagem gera uma série de vantagens no meio agrícola, entre elas: antecipação da colheita e consequente disponibilização da área para novos cultivos; redução da perda do produto no campo; armazenagem por períodos mais longos e sem deterioração do produto; e prolongamento do poder germinativo das sementes. Além disso, a secagem gera redução do peso dos bens perecíveis, com a consequente redução do custo de transporte e armazenamento.

O processo de secagem é bastante utilizado e difundido no meio agrícola (EMBRAPA, 2017). No Brasil, um dos gêneros alimentícios que mais se destacam pelo volume produzido e consequentemente pelo volume de grãos que passam pelo processo de secagem é o milho, que

se destina tanto para o consumo humano quanto para a alimentação animal. Dados do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) apontam que a produção de milho representa 41,1% da produção agrícola total do Brasil em 2017 (IBGE, 2017).

Segundo dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2017), na safra de 2016/2017 o Brasil ficou em terceiro no *ranking* mundial de produção de milho, com 93,5 milhões de toneladas produzidas, atrás apenas dos EUA (384,8 milhões de toneladas) e China (219,6 milhões de toneladas). Em relação às exportações mundiais de milho, no mesmo período, o Brasil ficou em segundo lugar com 32 milhões de toneladas exportadas, passando à frente de grandes exportadores como Argentina e Ucrânia, porém ficando atrás dos EUA, com 56,5 milhões de toneladas. Quanto ao consumo mundial de milho ainda da safra 2016/2017, o Brasil se encontra em quarta posição com 60 milhões de toneladas consumidas, atrás de EUA (314,8 milhões de toneladas), China (231 milhões de toneladas) e União Europeia (73 milhões de toneladas).

A secagem natural do milho no campo é bastante difundida no Brasil e é prática comum entre pequenos agricultores (SILVA, 2008). Entre 70 e 80% do milho produzido no país é secado de forma natural e permanece na lavoura até alcançar os 13% de umidade, percentual ideal para ser armazenado, enquanto 20 a 30% da produção passam pelo processo de secagem artificial. A secagem do milho em campo é uma boa opção para pequenos agricultores por ser um processo simples, barato e que não demanda a necessidade de equipamentos de secagem artificial. Entretanto, a qualidade do milho pode ser gravemente afetada pelo tempo excessivo de secagem natural, onde o produto se torna mais suscetível às intempéries climáticas e ao ataque de pragas e fungos. Além disso, a secagem do milho por períodos mais prolongados na lavoura pode provocar perda de massa dos grãos secos devido ao processo respiratório, ou seja, deterioração do produto (EMBRAPA, 2017).

Dessa forma, a secagem artificial se torna uma importante técnica para médios e grandes produtores. Silva (2008) afirma que quanto maior o volume produzido dos gêneros agrícolas, mais relevante se torna a secagem artificial.

A partir das informações e dados apresentados anteriormente, fica clara a importância da cultura do milho para o Brasil, assim como da necessidade da diminuição das perdas na lavoura. A secagem artificial aparece então como um processo significativo na redução da quantidade de material perdido durante a colheita e pós-colheita e na garantia de melhor qualidade dos grãos produzidos.

1.1. Justificativa

A secagem artificial de grãos, geralmente realizada em secadores, baseia-se em técnicas para acelerar a retirada da umidade dos produtos. Para isso, é comum a utilização de componentes para aquecimento do ar (por exemplo, fornalhas a lenha, queimadores a gás e caldeiras), componentes para movimentação e insuflação do ar (como ventiladores) e componentes para transporte dos grãos (EMBRAPA, 2017). Dessa forma, o uso de secadores envolve um consumo considerável de energia elétrica e de combustível. Porém, razões de produtividade agrícola e disponibilidade de mão de obra no meio rural tornam a secagem um método economicamente viável para uma série de produtos (LASSERAM, 1978).

A secagem, em especial do milho, pode representar mais de 65% do consumo total de energia gasta na produção dos grãos (BROOKER et al., 1974). Operações de secagem e armazenagem executadas de maneira correta e utilizando equipamentos eficientes são fundamentais para a redução dos custos de produção, devido à economia de energia que esses podem gerar (SILVA, 2008).

Considerando que a secagem utilizando temperaturas elevadas do ar insuflado pode consumir grande parte da energia usada na produção dos produtos agrícolas, é necessário realizar a análise das perdas energéticas envolvidas no processo de secagem, a fim de propor soluções que aumentem a eficiência energética dos secadores. Para isso, têm sido amplamente utilizadas as análises energéticas e exergéticas na secagem de grãos (DINCER; SAHIN, 2004; AGHBASHLO et al., 2013; AMANTÉA et al., 2013; RANJBARAN; ZARE, 2013; RANJBARAN et al., 2014). Segundo Bala (2016), as análises de energia e exergia nos processos de secagem de grãos são realizadas a fim de se descobrir as interações energéticas e o comportamento termodinâmico do ar de secagem ao longo da câmara de secagem. Assim, estas análises podem ser utilizadas para se alcançar um uso mais eficiente dos recursos energéticos.

A análise energética é baseada na primeira lei da termodinâmica, onde se admite a conservação de energia dentro de um sistema fechado, através da conversão de uma forma de energia em outra, não fornecendo informações a respeito dos aspectos de reversibilidade dos processos termodinâmicos. Já a análise exergética é baseada na segunda lei da termodinâmica e leva em consideração as reversibilidades ou irreversibilidades dos processos. A disponibilidade máxima de energia em um processo, denominada exergia, corresponde ao

trabalho útil máximo que pode ser obtido de um sistema à medida que este é levado ao estado de equilíbrio com o ambiente (estado morto). Durante um processo termodinâmico, como a secagem, a irreversibilidade resulta na destruição de exergia. Isso significa que a energia térmica do ar quente não estará completamente disponível para aquecer o leito de grãos. Isso pode ser explicado pelo conceito de entropia presente na segunda lei da termodinâmica (AMANTÉA et al., 2013; RANJBARAN; ZARE, 2013).

Apesar de a análise energética ser uma importante ferramenta na análise dos processos termodinâmicos, esta pode apresentar resultados enganosos. A análise exérgica pode ser considerada uma medida mais realista do desempenho dos sistemas de secagem. Daí a importância de se realizar tanto a análise energética quanto a exérgica e de se comparar os resultados encontrados (RANJBARAN; ZARE, 2013).

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 transporte de calor e massa envolvidos na secagem (SRIVASTAVA; JOHN, 2002; ISTADI; SITOMPUL, 2002; ZARE et al., 2006; DELPASQUALE et al., 2008; THORPE, 2008; NAGHAVI et al., 2010; ROCHA et al., 2013; RYU et al., 2013; PRUKWARUN et al., 2013; RANJBARAN et al., 2014). Muitos autores afirmam que técnicas computacionais de solução de problemas matemáticos têm se mostrado muito precisas e mais economicamente viáveis (XIA; SUN, 2002; NORTON; SUN, 2006; JAMALEDDINE; RAY, 2010; DEFRAEYE, 2014). A simulação numérica computacional através da técnica numérica *Computational Fluid Dynamics* (CFD) se apresenta então como uma importante ferramenta para a solução de modelos matemáticos de secagem de grãos e para a análise das perdas energéticas e exérgicas nos secadores.

Um dos softwares comerciais mais utilizados para a simulação em CFD é o *ANSYS Fluent*, que utiliza o Método dos Volumes Finitos para resolução de seus modelos matemáticos de mecânica dos fluidos e transferência de calor e de massa. O software em sua versão padrão não apresenta um modelo específico para secagem de grãos e para o cálculo das eficiências energética e exérgica, sendo necessária a utilização da função *User-Defined Function* (UDF), onde o usuário tem a possibilidade de personalizar o programa.

Apesar de alguns autores já utilizarem o software *ANSYS Fluent* e a função UDF para simulação do processo de secagem de grãos (THORPE, 2008; RYU et al., 2013; PRUKWARUN et al., 2013; RANJBARAN et al., 2014), estes na maioria das vezes utilizam um modelo matemático de equilíbrio para meios porosos para simulação do processo de

transferência de calor entre o ar de secagem e o leito de grãos, onde considera-se que as temperaturas do ar de secagem e do leito de grãos estão em equilíbrio. Esta é uma boa aproximação, porém pode induzir a alguns erros, principalmente no início da secagem (BROOKER et al, 1974). Como mais uma forma de diferenciar o presente trabalho dos demais trabalhos encontrados na literatura, será elaborado um modelo de secagem utilizando um modelo matemático de não-equilíbrio através do software *ANSYS Fluent*, onde há duas equações de conservação para prever o comportamento da transferência de calor que ocorre no ar e no leito de grãos.

1.2. Objetivos

O presente 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;

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- 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 *User-Defined Function (UDF)*;
- Comparar os resultados numéricos obtidos com dados presentes na literatura para validação do modelo matemático;
- Realizar um estudo energético e exerético dos secadores, através do cálculo das eficiências energética e exerética de secagem;
- Avaliar o comportamento das eficiências energética e exerética através da variação de parâmetros de secagem;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo traz uma revisão bibliográfica a respeito da simulação numérica utilizando a técnica numérica *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Os princípios básicos da psicrometria voltados à secagem e os principais modelos matemáticos utilizados para previsão do comportamento da secagem de grãos também são apresentados neste capítulo. Por fim, é discutido a respeito da utilização da análise energética e exergética na secagem.

2.1. *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

Grande parte dos modelos matemáticos elaborados para a previsão do comportamento de fenômenos físicos é baseado em Equações Diferenciais Parciais (EDP) acrescidos de condições de contorno e/ou condições iniciais (MOAVENI, 2007). As EDP's consistem em equações que contém algumas derivadas de uma função desconhecida (NAGLE et al., 2012).

Como em alguns modelos analíticos, a solução das EDP's pode apresentar o comportamento exato de um sistema para certas condições definidas. Porém, é muito comum a existência de problemas práticos onde é muito difícil, ou até mesmo impossível, de se encontrar soluções exatas. Tal dificuldade pode estar relacionada à alta complexidade das EDP's que governam o sistema ou aos obstáculos que aparecem ao se manusear as condições iniciais e de contorno (MOAVENI, 2007). Dessa forma, modelos analíticos para solução de problemas são aplicados para geometrias e condições de fronteira mais simples.

Uma forma alternativa para se resolver problemas mais complexos é através da utilização de métodos numéricos, cujo objetivo é transformar as EDP's em formas mais acessíveis, que são matematicamente menos complicadas, de modo a apresentar soluções aproximadas. Enquanto as soluções analíticas apresentam o comportamento exato de um sistema em qualquer ponto deste, soluções numéricas aproximam soluções exatas em apenas alguns pontos, chamados nós (MOAVENI, 2007; JAMALEDDINE; RAY, 2010).

Segundo Maliska (2010), a simulação numérica computacional nas áreas de mecânica dos fluidos e transferência de calor, também conhecida como *Computational Fluid Dynamics* (CFD), teve um rápido crescimento nos últimos anos e hoje se consolidou como um robusto método numérico para solução de problemas aplicados na engenharia. Norton e Sun (2006)

afirmam que o CFD é uma poderosa ferramenta numérica que tem se tornado largamente utilizada para simular processos na indústria de alimentos. Para os autores, a evolução da capacidade de processamento dos computadores e a redução dos custos de pacotes de softwares CFD fizeram com que este se tornasse uma técnica viável no fornecimento de soluções eficazes. Para Xia e Sun (2002), o CFD é um método de simulação que utiliza matemática aplicada para modelar situações de fluxo de fluidos para a previsão de fenômenos de transferência de calor e massa, quantidade de momento e otimização de processos industriais. Jamaledine e Ray (2010) indicam que o CFD é um instrumento com grande capacidade para o projeto de secadores, e através desse é possível obter um melhor controle e compreensão do projeto quando comparado com a experimentação.

A etapa inicial dos procedimentos numéricos é a discretização, ou seja, decomposição de um domínio em partes (ou Volumes de Controle - VC) menores e menos complexas, com a finalidade de facilitar os cálculos. Uma das técnicas do estudo em CFD utilizadas para isso é o Método de Volumes Finitos (MVF). Patankar (1980) foi um dos primeiros autores a escrever sobre o MVF para solução de problemas envolvendo transferência de calor e massa e escoamento de fluidos.

Para obtenção do sistema de equações algébricas aproximadas do MVF, é feita a integração no espaço e no tempo das equações em forma diferencial dos balanços de conservação de massa, energia e quantidade de movimento para cada um dos volumes elementares obtidos através da discretização. Para que o modelo matemático fique completo, ainda é necessária a inserção de condições iniciais e de contorno no domínio. É importante mencionar que quanto maior o número de volumes elementares, mais próximo da solução exata tenderá a solução numérica, e mais preciso se tornarão os cálculos. Porém, o aumento do número de volumes conseqüentemente aumenta o número de equações e incógnitas a serem resolvidas, aumentando de forma considerável o esforço computacional (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007; MALISKA, 2010).

Para obtenção da solução do sistema de equações algébricas discretizado pelo MVF, é ainda necessária a utilização de métodos diretos ou iterativos para resolução de matrizes. Para aplicações em CFD, geralmente se utilizam os métodos iterativos, que demandam menor esforço computacional ao trabalhar com mecânica dos fluidos e transferência de calor (MALISKA, 2010).

Segundo Xia e Sun (2002), Norton e Sun (2006), Jamaledine e Ray (2010) e Defraeye (2014), o *ANSYS Fluent* é um dos mais importantes softwares comerciais que utilizam a

ferramenta CFD. Os autores trazem uma ampla revisão bibliográfica sobre trabalhos que utilizam o software *ANSYS Fluent* aliado ao método CFD para resolução de problemas relacionados à secagem.

O software *ANSYS Fluent* em sua versão padrão não apresenta um modelo matemático específico para simulação da secagem de grãos. Dessa forma, é necessário realizar algumas modificações no código fonte do programa utilizando a função *User-Defined Function* (UDF). A UDF é uma ferramenta que permite a personalização do software *ANSYS Fluent* e tem o objetivo de aprimorar seus recursos padrões. Segundo ANSYS (2017b), as UDFs:

- São escritas na linguagem de programação C;
- Utilizam macros e funções predefinidas para acessar os dados do solucionador de problemas do *ANSYS Fluent* e para executar outras tarefas;
- São executadas como funções interpretadas ou compiladas;
- São acessadas utilizando uma interface gráfica de caixas de diálogo.

Mais informações a respeito da escrita, estrutura, compilação, utilização e limitações das UDFs estão disponíveis em ANSYS (2017b).

2.2. Princípios básicos da psicrometria

O ar atmosférico é constituído por uma mistura de ar seco (gases nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, etc.) e vapor de água. Dessa forma, a psicrometria é o estudo das propriedades do ar úmido (ar seco + vapor de água), e esta tem grande importância na secagem de grãos, devido às trocas de umidade que ocorrem entre os produtos a serem secados e o ar que os envolvem (SILVA, 2008).

A quantidade de vapor de água presente no ar úmido pode variar de zero a um valor correspondente à condição de saturação, sob determinada condição de temperatura e pressão atmosférica. Diz-se que um ar é saturado quando ele já atingiu sua capacidade máxima de absorção de umidade.

Há alguns conceitos e propriedades termodinâmicas importantes para a psicrometria. São eles (SILVA, 2008; DINCER; ZAMFIRESCU, 2016):

- *Temperatura de bulbo seco*: temperatura medida com um termômetro comum;

- *Temperatura de bulbo úmido*: temperatura indicada por um termômetro, cujo bulbo é mantido úmido e exposto a uma corrente de ar;
- *Temperatura do ponto de orvalho*: temperatura na qual o vapor de água se torna saturado e se condensa, quando o ar úmido é resfriado a pressão constante;
- *Pressão de vapor*: pressão parcial de vapor de água contido no ar úmido;
- *Pressão de saturação*: pressão de vapor de água contido no ar úmido quando a quantidade de vapor de água nele presente é suficiente para saturá-lo a uma dada temperatura;
- *Umidade relativa*: razão entre a pressão parcial de vapor de água contido no ar úmido e a pressão de saturação, para a mesma temperatura;
- *Razão de mistura*: razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco em dado volume da mistura, em bulbo seco. Neste trabalho, o conceito razão de mistura foi abordado como umidade absoluta do ar úmido;
- *Volume específico do ar úmido*: definido como o volume de ar úmido por unidade de massa de ar seco;
- *Entalpia do ar úmido*: quantidade de energia contida na mistura ar seco + vapor de água por unidade de ar seco (composição das entalpias para o ar seco e para o vapor de água a determinada temperatura);

2.3. Secagem de grãos

Grande parte dos autores aproxima o comportamento do leito de grãos a um meio poroso, onde cada tipo de grão possui uma resistência específica ao escoamento, o que gera perda de pressão ao longo da coluna de grãos. Segundo Souza (2013), a perda de pressão nesse processo de secagem está relacionada à resistência imposta ao deslocamento do ar forçado ao atravessar a massa de sementes, como consequência de perdas de energia por fricção e turbulência. Normas internacionais, como por exemplo, a ASAE (2011), apresentam valores específicos de resistência ao escoamento para vários tipos de grãos.

De acordo com Brooker et al. (1974), Parry (1985) e Parti (1993) o processo de secagem é dividido em modelo de camada fina e modelo de camada espessa, já que o

comportamento do produto apresenta-se de maneira distinta para as duas situações. No processo de secagem em camada fina, o ar escoar por um leito delgado de material úmido, apresentando temperatura, fluxo mássico e teores de umidade constantes em todo o volume para cada intervalo de tempo, e considera-se que a camada de grãos se comporta como apenas um grão individual (SOUZA, 2013). Já no processo de secagem em camada espessa, as propriedades tais como temperatura e teor de umidade para o grão e para o ar variam simultaneamente com o tempo e com a posição espacial dentro do leito de grãos (BORTOLAIA, 2011). Muitos autores como Thompson et al. (1968), Brooker et al. (1974), Sharp (1982), Courtois et al. (1991), Liu e Bakker-Arkema (2001), Zare et al. (2006), Aregba e Nadeau (2007) e Kashaninejad et al. (2007), representam a camada espessa como uma série de camadas finas sucessivas.

Diversos modelos matemáticos para simular a secagem de grãos em camada fina são encontrados na literatura (LEWIS, 1921; PAGE, 1949; HUKILL, 1954; BOYCE, 1965; LUIKOV, 1996; BAKKER-ARKEMA et al., 1967; HANDERSON; HANDERSON, 1968; THOMPSON et al., 1968; OVERHULTS et al., 1973; BROOKER et al., 1974, FORTES; OKOS, 1980; MISRA; BROOKER, 1980). Na prática, os modelos mais utilizados para obtenção da cinética de secagem são os de camada fina, cujas equações apresentam uma variável de teor de umidade em função do tempo. Jayas et al. (1991) apresentam uma vasta revisão bibliográfica a respeito dos diferentes modelos matemáticos desenvolvidos para prever o comportamento da secagem de grãos em camada fina. Os primeiros estudos de secagem de grãos deram origem a modelos matemáticos logarítmicos e exponenciais, que são mais simplificados na obtenção de soluções. Posteriormente foram desenvolvidos modelos empíricos e semi-empíricos baseados em balanços de calor e de massa, porém ainda bastante simplificados. Nas últimas décadas, com a disponibilidade de maiores recursos computacionais, foram desenvolvidos modelos de secagem baseados em Equações Diferenciais Parciais (EDP), e estes tem sido muito utilizados (PARRY, 1985; SOUZA, 2013).

Lewis (1921) em seu trabalho propôs um modelo exponencial e semi-empírico de secagem de grãos semelhante à lei de resfriamento de Newton, onde ele sugeriu que durante a secagem de materiais porosos a taxa de redução do teor de umidade é proporcional à diferença instantânea entre o teor de umidade do produto e o teor de umidade esperado para o material quando ele entra em equilíbrio com o ar de secagem. Page (1949) modificou o modelo anterior, apresentando uma nova equação exponencial e empírica ajustada através da

utilização de dados experimentais de secagem de milho em camada fina, obtendo resultados mais satisfatórios do que o modelo anterior. Hukill (1954) em sua obra propôs o primeiro modelo logarítmico para a secagem de sementes, e até os dias de hoje este ainda é utilizado para a previsão do comportamento da secagem com baixas temperaturas de ar e em leito espesso de grãos. Este último modelo admite que a variação do teor de umidade do produto depende da altura da camada de grãos e do tempo de secagem, e ainda despreza o calor sensível do produto, considerando que a temperatura do ar decresce exponencialmente, à medida que passa pela massa de grãos, e que as condições do ar de entrada se mantêm constantes. Modelos logarítmicos e exponenciais são vantajosos pela sua simplicidade, porém possuem uma limitação por serem mais adequados para temperaturas mais baixas e menores vazões de ar (PARRY, 1985).

Boyce (1965) desenvolveu um modelo semi-empírico de secagem de grãos em leito fixo para simular a secagem da cevada, onde foi obtida uma boa aproximação da temperatura e do teor de umidade dos grãos calculados com os dados experimentais. Bakker-Arkema et al. (1967) apresentaram um modelo baseado em equações de transferência simultânea de calor e massa que resultam em um sistema de EDP's que são resolvidas numericamente. Os autores variaram alguns parâmetros do ar de entrada e conseguiram calcular o teor de umidade médio do leito de grãos ao longo do tempo com um erro de $\pm 5\%$ em relação aos dados experimentais. Thompson et al. (1968) realizaram testes com a secagem de milho em camada delgada e sugeriram um sistema de equações baseado em balanços de energia e massa. Através de dados experimentais de secagem de milho, os autores ajustaram uma curva de secagem exponencial de segunda ordem, permitindo assim a predição do comportamento da secagem do milho com escoamento de ar paralelo, cruzado e contracorrente, e com temperaturas do ar de secagem elevadas.

Henderson e Henderson (1968) propuseram um procedimento analítico semi-empírico semelhante para calcular o teor de umidade do leito de grãos para camada espessa. Neste modelo, os resultados calculados numericamente foram comparados com dados experimentais, onde foi obtida uma boa aproximação principalmente nas primeiras camadas do leito de grãos, enquanto que nas camadas mais distantes da entrada de ar foram obtidos maiores erros em relação à temperatura e teor de umidade dos grãos. Brooker et al. (1974) apresentaram modelos teóricos de não-equilíbrio, sendo que esses modelos são baseados em balanços de energia e massa para uma camada fina de grãos, e neles se presume que as condições são constantes ao longo de certo intervalo de tempo. Os autores fizeram uma série

de considerações, tais como encolhimento dos grãos desprezível, gradiente de temperatura no interior dos grãos desprezível, condução entre os grãos desprezível e transferência de calor e massa unidimensional.

Segundo Bortolaia (2011), as equações teóricas para secagem de grãos não têm sido utilizadas, uma vez que elas apresentam baixa precisão no cálculo do teor de umidade de equilíbrio. Dessa forma, equações empíricas e semi-empíricas para camada delgada têm sido mais empregadas com o intuito de melhor representar o comportamento dos grãos durante a secagem (GUIMARÃES, 2005).

Para Parry (1985), tanto os modelos logarítmicos como os modelos de balanço de calor e massa contribuíram consideravelmente para um melhor entendimento dos processos envolvidos na secagem de grãos de leito fixo, porém eles mostraram várias limitações na precisão dos resultados e na aplicabilidade. Dessa forma, muitos pesquisadores têm se dedicado a implementar modelos de secagem de grãos mais precisos utilizando EDP's, que se tornaram vantajosos por causa do desenvolvimento de técnicas computacionais eficientes, precisas e estáveis, e da alta capacidade de processamento dos computadores atuais.

Van Arsdel (1955) e Klapp (1963) foram um dos autores pioneiros na utilização de EDP's para a resolução de problemas de transferência simultânea de massa e calor na secagem de grãos em leito fixo. Martins et al. (1982) desenvolveram um programa computacional para resolver as EDP's do modelo de secagem de milho em camada estacionária apresentado por Brooker et al. (1974), e compararam os resultados encontrados através do modelo com diversos testes experimentais com diferentes condições de secagem, obtendo um desvio máximo de 5,4%. Laws e Parry (1983) apresentaram um modelo geral para a secagem de grãos utilizando um sistema de EDP's, levando em consideração condições e hipóteses simplificadas para a transferência de calor e massa. Os autores apresentaram equações para os quatro tipos básicos de secadores de grãos convectivos - leito fixo, fluxo paralelo, fluxo cruzado e contrafluxo - e por fim discutiram algumas das diferenças entre os modelos apresentados por eles e por outros autores.

França et al. (1994) utilizaram o modelo de Brooker et al. (1974) e desenvolveram um modelo uni e bidimensional em leito fixo para secagem de milho. No modelo apresentado pelos autores, foi levado em consideração a variação da massa específica do ar em função da temperatura e foi feita a análise do escoamento de ar no interior do secador. Para a resolução das EDP's, França et al. (1994) utilizaram o Método de Elementos Finitos (MEF) e o Método

de Volumes Finitos (MVF), e posteriormente compararam os resultados obtidos no modelo com outros resultados numéricos contidos na literatura, obtendo boa aproximação.

Souza (1996) aplicou as equações do modelo de secagem desenvolvido por França et al. (1994) para simular a secagem de milho em leito fixo e camada espessa. O autor utilizou o MEF e a técnica numérica de Runge-Kutta para resolução das EDP's, onde foi possível prever o comportamento da secagem para secadores com escoamento de ar unidimensional, bidimensional e axissimétrico, sendo que neste último foram considerados para validação do modelo dados experimentais obtidos de um secador real utilizado na indústria. Souza (1996) ainda estudou o efeito da variação de alguns parâmetros de secagem sobre o tempo de secagem em um secador bidimensional, chegando à conclusão de que maiores temperaturas e pressões do ar na entrada e menores umidades relativas do ar de entrada aumentam a capacidade de secagem do secador e conseqüentemente diminuem o tempo.

Puri e Anantheswaran (1993) apresentaram uma vasta revisão sobre a utilização do MEF na resolução das EDP's para as operações de processamento de alimentos, incluindo a secagem de grãos e as transferências de calor e massa. Segundo os autores, a maioria dos estudos nessa área está voltada para escoamentos bidimensionais e/ou axissimétricos submetidos a um regime transiente, enquanto um pequeno número de trabalhos utiliza a análise tridimensional. Os autores ainda indicam que existe um potencial considerável para o uso do MEF no processamento de alimentos.

Courtois et al. (1991) propuseram um modelo de secagem unidimensional em camada espessa baseado nas equações de balanço de massa e de energia relacionando temperatura e umidade dos grãos e do ar, e ainda desenvolveram uma equação que avalia a qualidade dos grãos de milho, visando a modelagem de secadores reais. Para descrever a variação da umidade, o grão foi dividido em três partes: a primeira é formada pelo núcleo, a segunda é a parte intermediária e a terceira é a parte periférica do grão, onde a transferência de massa de uma parte para a outra ocorre por difusão, com coeficientes obtidos empiricamente. Para a transferência de calor, o grão foi considerado como uma camada uniforme. Em outra obra dos autores, Courtois et al. (1993) utilizaram o modelo anterior para simular o comportamento da secagem em um secador de grãos de milho. As simulações foram comparadas com dados experimentais, onde foi obtido um erro médio de 5% sobre o teor de umidade de milho previsto.

Srivastava e John (2002) também demonstraram um modelo para prever o comportamento do ar e do leito de grãos de milho durante a secagem e utilizaram a técnica

numérica de Runge-Kutta para solução das EDP's. Os autores chegaram à conclusão de que quanto maior a altura do leito de grãos, mais umidade contida nos grãos é vaporizada, ou seja, transferida dos grãos para o ar, e que a porosidade do leito de grãos não é muito afetada se a temperatura do ar cair em alguns graus.

Muitos autores utilizaram o Método das Diferenças Finitas (MDF) para resolução das EDP's dos modelos matemáticos de secagem. Istadi e Sitompul (2002) e Dalpasquale et al. (2008) apresentaram uma simulação numérica da secagem de milho em leito fixo e camada espessa usando um modelo baseado em EDP's, utilizaram o MDF para resolvê-lo e compararam os resultados obtidos numericamente com dados experimentais, obtendo uma boa aproximação.

Zare et al. (2006), Zare e Chen (2009) e Naghavi et al. (2010) propuseram um modelo para secagem de arroz cuja resolução se dá pelo MDF. Zare et al. (2006) compararam os resultados numéricos com resultados experimentais obtidos através de um protótipo de secador criado em laboratório, e conseguiram prever o comportamento da secagem com boa precisão, com todos os valores numéricos de teor de umidade médio do leito de grãos em função do tempo para diferentes alturas do secador apresentando um desvio padrão menor do que 9% em relação aos dados experimentais. Zare e Chen (2009) utilizaram os mesmos dados experimentais do trabalho anterior para validação do modelo e ainda otimizaram o desempenho do secador através da variação dos parâmetros fluxo e temperatura do ar na entrada a fim de minimizar o consumo de energia específica do secador. Naghavi et al. (2010) também validaram o modelo matemático utilizando os dados experimentais dos dois últimos trabalhos citados, e conseguiram obter resultados numéricos ainda mais próximos dos dados empíricos.

Em estudos mais recentes, muitos autores têm utilizado a ferramenta *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para simulação de modelos de secagem. Xia e Sun (2002), Norton e Sun (2006), Jamaledine e Ray (2010) e Defraeye (2014) apresentam uma vasta revisão bibliográfica a respeito da utilização do CFD para resolução de problemas de secagem, expõem os modelos físicos mais comumente utilizados para esse tipo de aplicação e ainda trazem vantagens e desvantagens da utilização dessa ferramenta para a secagem. Xia e Sun (2002) afirmam que houve recentemente um crescimento considerável na aplicação de modelos em CFD na área de secagem e que, embora ainda existam alguns obstáculos, como a incapacidade de simulação precisa de grandes problemas tridimensionais em um computador

a preços acessíveis, a tendência da aplicação generalizada do CFD na indústria de alimentos continuará no século 21.

Norton e Sun (2006) concluem que os estudos em CFD trazem grandes benefícios não só para o mundo acadêmico, mas também trazem grandes vantagens financeiras para o ambiente comercial. Os autores afirmam que a modelagem em CFD atingiram níveis elevados de sofisticação com modelos de turbulência e multifásicos sendo desenvolvidos e validados por vários especialistas e posteriormente empregados na indústria química e alimentar e que, com o poder de computação atual progredindo, é fato que o CFD irá continuar a fornecer explicações para mais fenômenos de escoamento e de transferência de calor e de massa, levando a um melhor projeto de equipamentos e controle de processos para a indústria de alimentos.

Jamaledine e Ray (2010) reforçam que o CFD pode ser usado para entender e projetar melhor os equipamentos de secagem com menos custo e esforço do que os testes laboratoriais, e que estudos recentes mostraram que as técnicas de CFD foram adaptadas com sucesso para simular processos térmicos de secadores industriais e que essas técnicas são rotineiramente utilizadas devido à disponibilidade de pacotes comerciais fáceis de manipular. Embora as técnicas de CFD sejam amplamente utilizadas atualmente, os autores lembram que o utilizador de softwares de CFD não deve depender completamente dessas técnicas para tirar uma decisão concreta do sistema simulado, e sim deve entender que essas simulações são qualitativas e não meramente quantitativas. Além disso, devido à natureza complexa dos processos que ocorrem nos sistemas de secagem, devem ser realizadas amplas simulações para demonstrar que a solução possui alto nível de precisão.

Defraeye (2014) exalta a utilização do CFD para resolução de problemas de secagem de materiais porosos, porém cita vários desafios que a técnica computacional necessita de superar, sendo eles: determinação das propriedades dos materiais de forma apropriada, validação dos modelos matemáticos com dados experimentais mais confiáveis, modelos multifísicos mais completos e modelos de secagem mais integrados com outros modelos físicos e também mais orientados para cálculos de consumo ou eficiência de energia. Ainda de acordo com o autor, o desenvolvimento de softwares em CFD mais fáceis de usar é fundamental para preencher a lacuna existente atualmente entre os modelos obtidos através da pesquisa por instituições acadêmicas e a indústria, de forma a torná-lo mais atraente. Defraeye (2014) ainda afirma que esses métodos computacionais avançados como o CFD mostram perspectivas promissoras para ajudar a desenvolver tecnologias de secagem mais sustentáveis,

adaptadas aos novos requisitos das futuras gerações, e deverão desempenhar um papel cada vez mais importante na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias na área da secagem.

Thorpe (2008) destacou a importância da utilização do CFD no desenvolvimento de modelos matemáticos robustos e flexíveis para resolução dos problemas de transferência de calor e umidade que ocorrem na secagem de grãos. No entanto, o autor diz que os softwares de CFD precisam ser customizados para poderem calcular a velocidade, temperatura e distribuição de umidade durante a secagem, já que em suas versões padrões não existem modelos de secagem de grãos disponíveis. Thorpe (2008) no seu trabalho apresentou um modelo de secagem de trigo e demonstrou como os resultados são retratados graficamente no software *ANSYS Fluent* de forma a permitir que o usuário adquira o maior número de informações a respeito do processo de secagem de grãos.

Rocha et al. (2013) apresentaram um modelo de secagem para grãos de milho baseado em CFD e validaram a simulação numérica utilizando dados experimentais, obtendo uma boa aproximação. Ryu et al. (2013) desenvolveram um modelo tridimensional para análise da distribuição do fluxo e umidade do ar em um secador utilizando a ferramenta CFD. Os autores otimizaram o projeto do secador a fim de obter a distribuição de escoamento de ar mais homogênea possível dentro do equipamento, através da variação da estrutura interna e dos produtos a serem secados.

Prukwarun et al. (2013) utilizaram o CFD para resolução de um problema de secagem de grãos em leito fixo, cujo modelo consiste no transporte de umidade em meios porosos e fluxo dinâmico de ar quente no secador. Os autores chegaram a algumas conclusões, tais como: baixas velocidades do ar na entrada são suficientes para remover a água contida nos grãos; a perda de entalpia com gases de combustão (17%-40%) e com a transferência de calor convectivo na parede do secador (5,5%-7,3%) são importantes perdas de energia térmica no secador; e cobrir a parede do secador com isolamento pode economizar energia em cerca de 5%.

Ranjbaran et al. (2014) aplicaram a técnica do CFD para simular o comportamento de secagem de arroz em um secador de leito profundo tridimensional, onde os resultados numéricos de secagem foram comparados com dados experimentais. Os autores obtiveram uma boa aproximação, com erros máximos para teor de umidade do leito de grãos, temperatura do ar e umidade absoluta do ar ficando em 6%, 10% e 9%, respectivamente.

Thorpe (2008), Ryu et al. (2013), Prukwarun et al. (2013) e Ranjbaran et al. (2014) utilizaram o software *ANSYS Fluent* para resolução do modelo matemático de secagem e fizeram algumas modificações através do emprego da função *User-Defined Function* (UDF). Através dessas alterações foi então possível inserir no software um modelo matemático para secagem, além de modificar os modelos já existentes de conservação de massa, energia e quantidade de movimento.

2.4. Análise energética e exergética de secadores

Segundo Bala (2016), as análises de energia e exergia nos processos de secagem são realizadas a fim de se descobrir as interações energéticas e o comportamento termodinâmico do ar de secagem ao longo da câmara de secagem. Para o autor, o cálculo da exergia pode ser utilizado para alcançar um uso mais eficiente dos recursos energéticos, pois permite se determinar os locais, os tipos e as magnitudes das perdas de energia. Çengel e Boles (2013) afirmam que o desempenho dos dispositivos de engenharia pode ser calculado através da exergia, que os autores definem como o máximo trabalho útil que pode ser obtido de um sistema em um determinado estado e em um ambiente específico. Ainda segundo os autores, a análise exergética é uma ferramenta poderosa para a otimização de sistemas termodinâmicos complexos, através das equações de balanço de energia aplicando a Segunda Lei da Termodinâmica.

Para Dincer e Sahin (2004), a análise de exergia pode ser aplicada para projetar sistemas térmicos mais eficientes, reduzindo suas ineficiências. Dincer (2011) demonstra em seu trabalho que a exergia pode desempenhar um papel significativo na obtenção de um uso de energia mais eficiente, sustentável e econômico em sistemas de secagem.

Aghbashlo et al. (2013) afirmam que nos últimos anos tem crescido a utilização da análise exergética em processos e sistemas de secagem, sendo que esse maior interesse é estimulado pelo aumento do preço das energias, preocupações ambientais, população mundial, diminuição dos recursos de combustíveis fósseis e exigência de produtos secos de alta qualidade. Os autores apresentam uma revisão bibliográfica a respeito do uso da análise exergética em operações e instalações de secagem e mostram que a análise de exergia com o intuito de aumentar a eficiência do sistema foi utilizada em um pequeno número de trabalhos na área de secagem, e que ainda há um grande campo de pesquisa sobre o assunto,

principalmente em temas como reutilização do ar de exaustão, incorporação de sistemas de recuperação de calor, aplicação de isolamento para evitar perda de calor para o ambiente, utilização da secagem em múltiplos estágios, entre outros. Aghbashlo et al. (2013) ainda afirmam que uma boa parte dos autores tem se dedicado à pesquisa na área de análise exergética para sistemas de secagem que utilizam energias renováveis, como a solar, e que a grande maioria de autores estuda a análise exergética somente em termos de energia, exergia e eficiência, sendo que poucos autores realizam um estudo econômico dos sistemas de secagem.

Existem na literatura vários trabalhos relacionados à aplicação da análise energética e exergética para identificar desperdícios e perdas em secadores. Topic (1995) empregou um modelo matemático de análise exergética em um secador industrial de alta temperatura. O autor realizou a análise tanto para cada um dos componentes do sistema quanto para o sistema geral, e chegou à conclusão de que a eficiência de exergia da panela de mistura do produto aumentou com o aumento do teor de umidade do mesmo, porém a eficiência exergética do secador, do forno e do sistema geral foi praticamente constante com a variação do teor de umidade.

Dincer e Sahin (2004) apresentaram um modelo de análise termodinâmica, em termos de exergia, de um processo de secagem, onde as eficiências exergéticas são baseadas nos balanços de calor e massa. Os autores ainda investigaram o comportamento da eficiência exergética através da variação de alguns parâmetros de secagem e concluíram que a eficiência de exergia do processo de secagem diminuiu com o aumento da temperatura, taxa de fluxo e umidade relativa do ar de secagem. No entanto, a eficiência exergética do processo de secagem aumentou com o aumento da taxa de fluxo de produto.

Ozgener e Ozgener (2006) apresentaram uma modelagem energética e exergética do processo de secagem industrial de macarrão para análise, avaliação de desempenho e otimização do sistema, e demonstraram que as eficiências exergéticas da câmara de secagem e do sistema inteiro foram entre 73,0-82,2% e 41,9-70,9%, respectivamente.

Amantéa et al. (2013) abordaram a análise das eficiências energética e exergética na secagem de milho em leito fixo e camada espessa através de modelos transitórios fundamentados tanto na primeira como na segunda lei da termodinâmica, e apresentam uma metodologia para a otimização de secadores baseado nas eficiências de energia e exergia e no controle de parâmetros operacionais, tais como velocidade e temperatura do ar e teor de umidade inicial do produto. Os autores demonstraram que maiores eficiências energéticas foram obtidas com maiores teores de umidade inicial dos grãos, menores velocidades do ar e

menores temperaturas do ar de secagem, enquanto maiores eficiências exergéticas foram obtidas com maiores teores de umidade inicial dos grãos, menores velocidades do ar e maiores temperaturas do ar de secagem.

Ranjbaran e Zare (2013) analisaram o desempenho da secagem de soja em leito fluidizado com base na primeira e segunda lei da termodinâmica para diversas condições de secagem. Os resultados dos autores mostraram que era mais eficiente não aplicar energia de microondas no primeiro estágio do processo de secagem por leito fluidizado e que a aplicação de temperaturas do ar de secagem mais elevadas levou a maiores eficiências de exergia. Os valores dos desvios padrões médios para as previsões das eficiências e ineficiências do processo de secagem foram inferiores a 14%, em comparação com os calculados utilizando dados experimentais.

Ranjbaran et al. (2014) analisaram o desempenho energético e exergético da secagem em leito fixo e em camada espessa de grãos, investigando os efeitos da temperatura do ar de entrada e da taxa de fluxo de massa no desempenho do secador. Os autores demonstraram em seu trabalho que temperaturas mais elevadas do ar de entrada e menores taxas de fluxo mássico produziram maiores eficiências de exergia da secagem em um leito profundo de grãos.

Ainda de acordo com Ranjbaran et al. (2014), as técnicas de modelagem de CFD podem ser utilizadas na análise energética e exergética de processos de secagem de grãos em camada espessa. Para os autores, essas análises fornecem uma melhor visão da secagem em camada espessa de grãos e podem produzir novas ideias práticas para melhorar, aperfeiçoar e controlar de forma mais eficaz tais sistemas de secagem.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho aborda a elaboração de um modelo matemático bidimensional para escoamento do ar dentro de um secador de grãos e para a secagem de milho em leito fixo em camada espessa utilizando as equações de transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional, ou *Computational Fluid Dynamics* (CFD), presentes na literatura. É utilizado o Método de Volumes Finitos (MVF) para solução das Equações Diferenciais Parciais (EDP), através da utilização do software *ANSYS Fluent 18.0*. São utilizados o modelo matemático de não-equilíbrio para meios porosos e a função *User-Defined Function* (UDF) disponíveis no software. O modelo é validado através de dados presentes na literatura.

Após validação do modelo matemático, foi feito um estudo de análise energética e exergética para dois secadores diferentes, um com escoamento de ar unidimensional e outro com escoamento de ar bidimensional, através do cálculo das eficiências energética e exergética de secagem, com o intuito de quantificar as perdas de energia e exergia durante o processo. Neste estudo, avaliou-se o comportamento dessas eficiências através da variação de alguns parâmetros de secagem.

3.1. Considerações do modelo matemático

O modelo matemático para secagem de milho proposto é composto de uma série de EDP's para a conservação de massa do ar de secagem, conservação de quantidade de movimento do ar de secagem, balanço de umidade do ar de secagem, balanço de umidade para o produto e conservação de energia do ar e do leito de grãos, e é baseado nos modelos em CFD apresentados na literatura. As considerações do modelo matemático são baseadas no trabalho de França et al. (1994), sendo elas:

- Um modelo de secagem para camada fina é utilizado 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 de umidade no interior dos grãos, ou seja, eles estão em equilíbrio térmico e higroscópico internamente;

- As paredes do secador são consideradas adiabáticas;
- O ar de secagem entra no secador com uma vazão constante;

Outras considerações ainda foram feitas baseadas nos trabalhos de Thorpe (2008) e Ranjbaran et al. (2014), sendo elas:

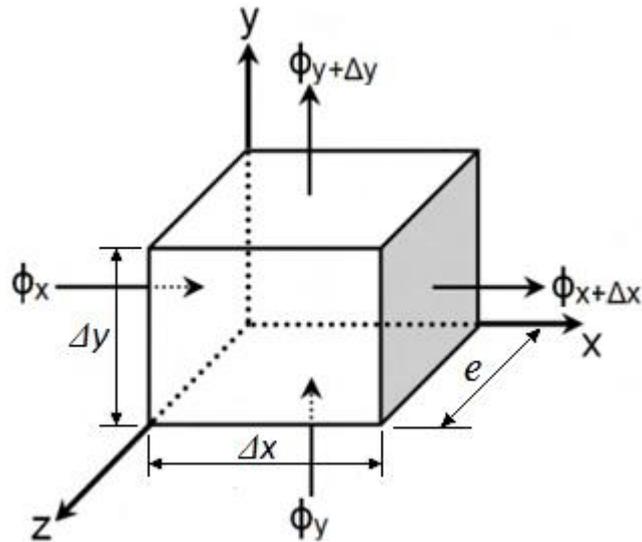
- As propriedades físicas do ar de secagem variam com a temperatura, e consequentemente variam com o tempo;
- As propriedades do leito de grãos variam com a umidade contida nos grãos, e consequentemente variam com o tempo;
- A transferência de calor por condução entre os grãos é considerada;
- O comportamento do leito de grãos é aproximado ao comportamento de um meio poroso;

Nesse trabalho será adotado um sistema de coordenadas cartesianas. Assume-se que a simbologia “ $\vec{}$ ” representa o vetor de uma variável de interesse ϕ , onde entende-se que haverá uma componente de ϕ nas direções x e y . Além disso, será empregado o símbolo ∇ para descrever tanto o operador gradiente quanto o operador divergente, e este representa a derivada parcial de uma variável de interesse ϕ em relação a todas as direções cartesianas, sendo definido de acordo com a Eq. (1) para uma geometria bidimensional.

$$\nabla\phi = \frac{\partial\phi_x}{\partial x} + \frac{\partial\phi_y}{\partial y} \quad (1)$$

O modelo de secagem de grãos de milho em camada estacionária proposto nesse trabalho é representado por uma série de EDP's. As equações de conservação são empregadas para cada um dos Volumes de Controle (VC) diferencial contidos dentro do leito de grãos. Tais equações de conservação referem-se à VC diferencialmente pequenos, e as propriedades nas fronteiras dos VC são tomadas como médias das propriedades dos volumes vizinhos, caso contrário elas seriam descontínuas nos limites dos volumes. Na Figura 2 é apresentado um esquema de um VC diferencial bidimensional, onde ϕ é uma variável de interesse, e é a espessura do leito de grãos, Δx e Δy são os comprimentos diferenciais do VC nas direções x e y , respectivamente.

Figura 2. Volume de controle diferencial.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.2. Conservação de massa para o ar

Nield e Bejan (2013) apresentam a conservação de massa para o ar de secagem através de um meio poroso de acordo com Eq. (2).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho_a) + \nabla \cdot (\rho_a \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

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.

3.3. Equação da quantidade de movimento para o ar

A equação da quantidade de movimento para o ar de secagem é dada pela Eq. (3) de acordo com Ranjbaran et al. (2013), Rocha et al. (2013) e ANSYS (2017c) 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.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho_a\vec{v}) + \nabla \cdot (\rho_a\vec{v}\vec{v}) = -\nabla P + \nabla\bar{\tau} + \rho_a\vec{g} + S_m \quad (3)$$

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. (4) (ROCHA et al., 2013; ANSYS, 2017c).

$$\bar{\tau} = \mu_a \left[(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T) - \frac{2}{3}\nabla \cdot \vec{v}I \right] \quad (4)$$

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 ocorre devido à perda de energia do ar em consequência do atrito deste com o grão, e depende de uma série de fatores, tais como do fluxo do ar, da superfície e da forma do produto, do tamanho e da configuração dos espaços vazios, da variação do tamanho das partículas e da profundidade da camada de produto.

Górnicki e Kaleta (2015a, b) trazem uma vasta revisão bibliográfica a respeito das equações para cálculo do gradiente de pressão gerado pelo leito de grãos. Thorpe (2008), Ranjbaran et al. (2013), Rocha et al. (2013) e ANSYS (2017c) calculam a resistência do leito de grãos ao fluxo de ar através da Eq. (5).

$$S_m = -\left(\frac{\mu_a}{\alpha}\vec{v} + C_2\frac{1}{2}\rho_a\vec{v}^2\right) \quad (5)$$

Onde α é a permeabilidade do leito de grãos, ou seja, capacidade de transmitir um fluido, e C_2 é o fator de resistência inercial. O primeiro termo a direita da Eq. (5) representa a resistência viscosa dada pela lei de escoamento de Darcy para meios porosos (BEJAN et al.,

2004; BEJAN, 2013; NIELD;BEJAN, 2013). Já o segundo termo descreve as perdas inerciais para meios porosos e tem maior importância para escoamentos com altas velocidades. Para escoamentos laminares a velocidades baixas, esse último termo comumente é desprezado, e o termo fonte da equação de conservação da quantidade de movimento passa a depender apenas da lei de Darcy (ANSYS, 2017c). Apesar do escoamento de ar do presente trabalho se enquadrar na última condição, ou seja, laminar a baixas velocidades, este último termo não será desconsiderado, uma vez que a inclusão deste não prejudica o resultado dos cálculos, e sim aumenta sua precisão.

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. (6).

$$S_m = -Rv - Sv^2 \quad (6)$$

Onde R e S são constantes específicas para cada tipo de grão. Para chegar aos valores de R e S , Hunter (1983) fez um ajuste no modelo para cálculo do gradiente de pressão ao longo do leito de grãos proposto por Ergun (1952), utilizando dados para diferentes tipos de grãos apresentados por Shedd (1953). Comparando as Eqs. (5) e (6), pode-se chegar aos valores da permeabilidade do leito de grãos α e do fator de resistência inercial C_2 através das Eqs. (7) e (8).

$$R = \frac{\mu_a}{\alpha} \quad (7)$$

$$S = \frac{C_2 \rho_a}{2} \quad (8)$$

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. (6) 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. Porém, na realidade, a queda de pressão na direção horizontal para grande parte dos grãos pode ser de 60% a 70% da queda de pressão para o fluxo de ar na direção vertical, resultando num meio poroso não isotrópico (ASAE, 2011).

Sabe-se que os testes experimentais para se chegar à Eq. (6) foram realizados numa coluna de grãos com escoamento de ar na vertical. Dessa forma, foi assumido no presente trabalho uma queda de pressão na direção horizontal de 70% da queda de pressão na direção vertical apresentada pela Eq. (6), que foi o mesmo percentual utilizado por Ranjbaran et al. (2014).

3.4. Balanço de umidade para o ar

O balanço de umidade para o ar de secagem proposto baseia-se no modelo apresentado por Brooker et al. (1974) e posteriormente por França et al. (1994) e Souza (1996). Segundo Brooker et al. (1992), o vapor de água transportado pelo ar de secagem para dentro do Volume de Controle (VC), apresentado na Figura 2, menos a quantidade de vapor de água que deixa o VC, adicionado à mudança na umidade do ar intergranular dentro dos espaços vazios do leito de grãos é igual à umidade perdida pelos grãos. Dessa forma, a quantidade de umidade que entra no VC pelas Superfícies de Controle (SC) de área A_x (edy) e A_y (edx), onde e é a espessura do leito de grãos, num instante dt está apresentada pela Eq. (9).

$$[\rho_a v_x A_x w + \rho_a v_y A_y w] dt \quad (9)$$

Onde ρ_a é a massa específica do ar, w é a umidade absoluta do ar e v_x e v_y são as velocidades nas direções x e y , respectivamente. Já a quantidade de umidade que sai do VC pelas SC num instante dt é apresentada pela Eq. (10).

$$- \left[\rho_a v_x A_x \left(w + \frac{\partial w}{\partial x} dx \right) + \rho_a v_y A_y \left(w + \frac{\partial w}{\partial y} dy \right) \right] dt \quad (10)$$

A diferença entre a umidade que entra e a que sai do VC pelas SC num instante dt é representado pela Eq. (11).

$$- \left[\rho_a v_x A_x \frac{\partial w}{\partial x} dx + \rho_a v_y A_y \frac{\partial w}{\partial y} dy \right] dt \quad (11)$$

A umidade do ar acumulada dentro do VC de volume dV ($edxdy$) num instante dt é dada pela Eq. (12).

$$\varepsilon \rho_a \frac{\partial w}{\partial t} dV dt \quad (12)$$

Onde ε é a porosidade do leito de grãos. A quantidade de vapor de água gerada no VC num instante dt está associada à umidade contida nos grãos que evapora e é transferida para o ar pelo processo de resfriamento evaporativo, e está representada pela Eq. (13).

$$-(1 - \varepsilon) \rho_g \frac{\partial M}{\partial t} dV dt \quad (13)$$

Onde M é o teor de umidade do leito de grãos, ρ_g é a massa específica do grão de milho e t é o tempo. Segundo Górnicki e Kaleta (2015a), a massa específica aparente do leito de grãos ρ_b pode ser escrita como $(1 - \varepsilon) \rho_g$. O sinal negativo da equação é devido à perda de água do produto secado para o ar.

Alguns autores ainda consideram um termo difusivo para a equação do balanço de umidade para o ar de secagem (THORPE, 2008; RANJBARAN et al., 2014). Segundo Thorpe (2008), os caminhos do escoamento do ar através do leito de grãos são tortuosos e parte da umidade é trocada entre o ar e os grãos através do processo de difusão. Pixton e Griffiths (1971) afirmam que quando o grão é exposto ao ar ambiente ele cederá ou absorverá umidade até entrar em equilíbrio com o vapor de água contido no ar. Ainda segundo os autores, o processo de difusão de umidade é lento e é mais significativo durante o armazenamento de grãos por grandes períodos. Provavelmente por essa razão e pela dificuldade de ser quantificada de forma precisa, a difusão de umidade entre o ar e os grãos é desconsiderado na maioria dos modelos de secagem. Thorpe (1982) ainda demonstrou que quando um leito de grãos de umidade inicial uniforme é submetido a uma diferença de temperatura, a umidade tende a passar dos grãos mais quentes para o grãos mais frios. Os trabalhos de Thorpe (1981, 1982) e Thorpe et al. (1991a, b) apresentam modelos para o cálculo do coeficiente de difusão de umidade em leito de grãos. Assim, a difusão de umidade no VC num instante dt é dada pela Eq. (14).

$$\rho_a \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{eff} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] dV dt \quad (14)$$

Onde D_{eff} representa o coeficiente efetivo de difusão de umidade. Vitorino (2009) apresenta uma equação experimental para o coeficiente efetivo de difusão de umidade para o leito de grãos de milho, e esta é demonstrada pela Eq. (15). Os valores de D_{eff} aumentam com a elevação da temperatura do ar de secagem, uma vez que a viscosidade da água diminui favorecendo a movimentação desse fluido por entre o produto (GONELI, 2008).

$$D_{eff} = 1,0673 \cdot 10^{-2} \cdot e^{\left(\frac{-31541,2931}{8,314 \cdot T} \right)} \quad (15)$$

Onde T é a temperatura absoluta do ar de secagem. Assim, o balanço de umidade para o ar de secagem resulta na Eq. (16).

$$\begin{aligned} \varepsilon \rho_a \frac{\partial w}{\partial t} dV dt = & - \left[\rho_a v_x A_x \frac{\partial w}{\partial x} dx + \rho_a v_y A_y \frac{\partial w}{\partial y} dy \right] dt + \rho_a \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \right. \\ & \left. \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{eff} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] dV dt - (1 - \varepsilon) \rho_g \frac{\partial M}{\partial t} dV dt \end{aligned} \quad (16)$$

Simplificando a Eq. (16) e a enquadrando no formato CFD, pode-se chegar às Eqs. (17) e (18), onde S_w é o termo fonte (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.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_a w) + \nabla \cdot (\rho_a \vec{v} w) = \nabla \cdot (\rho_a D_{eff} \nabla w) + S_w \quad (17)$$

$$S_w = -(1 - \varepsilon) \rho_g \frac{\partial M}{\partial t} \quad (18)$$

3.5. Balanço de umidade para o leito de grãos

Jayas et al. (1991) trazem uma vasta revisão bibliográfica sobre as várias equações de secagem para diferentes tipos de grãos. Para este trabalho é 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. (19) apresenta a taxa de variação do teor de umidade do leito de grãos ao longo do tempo. A e B são constantes definidas pelas Eqs. (20) e (21).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{M_e - M}{3600 \sqrt{A^2 + \left(\frac{1}{900}\right) B t}} \quad (19)$$

$$A = -4,10497 + 0,008784 \cdot T \quad (20)$$

$$B = 1,66209 \cdot 10^9 e^{(-5,9418 \cdot 10^{-2} \cdot T)} \quad (21)$$

Onde M é o teor de umidade dos grãos e M_e é o teor de umidade de equilíbrio para o milho. 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. (22) apresentada por Thompson et al. (1968).

$$M_e = \sqrt{\frac{\ln(1-RH)}{-0,688 \cdot (T-227)}} \quad (22)$$

Onde RH é a umidade relativa do ar de secagem. A umidade relativa do ar RH e a pressão de saturação do vapor P_{vs} são calculadas pelas Eqs. (23) e (24) (BROOKER et al, 1992; RANJBARAN et al., 2014).

$$RH = \frac{P_{atm}w}{(0,62189+w)P_{vs}} \quad (23)$$

$$P_{vs} = 100 \cdot e^{\left(27,0214 - \frac{6887}{T} - 5,31 \ln\left(\frac{T}{273,16}\right)\right)} \quad (24)$$

Onde P_{atm} é a pressão atmosférica, P_{vs} é a pressão de vapor de saturação e w é a umidade absoluta do ar.

3.6. 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).

Dessa forma, o modelo térmico de não equilíbrio inicia-se pelo balanço de energia para o ar de secagem. A entalpia do ar que entra através das SC de área A_x (edy) e A_y (edx) para cada VC do leito de grãos, conforme Figura 2, num instante de tempo dt é dada pela Eq. (25).

$$\left[\rho_a v_x A_x (c_a + c_v w) T + \rho_a v_y A_y (c_a + c_v w) T\right] dt \quad (25)$$

Onde c_a é o calor específico do ar seco e c_v é o calor específico do vapor de água. Já a entalpia do ar que sai através das SC de cada VC do leito de grãos num instante de tempo dt é dada pela Eq. (26).

$$-\left[\rho_a v_x A_x (c_a + c_v w) \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx\right) + \rho_a v_y A_y (c_a + c_v w) \left(T + \frac{\partial T}{\partial y} dy\right)\right] dt \quad (26)$$

A diferença entre a entalpia que entra e a que sai do VC pelas SC num instante dt é representado pela Eq. (27).

$$-\left[\rho_a v_x A_x (c_a + c_v w) \frac{\partial T}{\partial x} dx + \rho_a v_y A_y (c_a + c_v w) \frac{\partial T}{\partial y} dy\right] dt \quad (27)$$

O acúmulo de entalpia no VC de volume dV ($edxdy$) num instante dt é dado pela Eq. (28).

$$\frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon \rho_a (c_a + c_v w) T] dV dt \quad (28)$$

O calor transferido do ar para o leito de grãos por convecção num instante dt é dada pela Eq. (29).

$$-ha(T - \theta) dV dt \quad (29)$$

Onde a é a área superficial específica do grão, h é o coeficiente convectivo e θ é a temperatura absoluta do leito de grãos. O coeficiente convectivo h pode ser calculado pela Eq. (30) (BARKER, 1965; BROOKER et al., 1992; ZARE et al., 2006, NAGHAVI et al., 2010).

$$h = 0,2755 \cdot c_a \rho_a |v| \left(\frac{2r_0 \rho_a |v|}{\mu_a} \right)^{-0,34} \quad (30)$$

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.

Alguns autores ainda consideram um termo difusivo para condução térmica tanto no ar intergranular quanto no leito de grãos (THORPE, 2008; ROCHA et al., 2013; RANJBARAN

et al. 2014). A condução térmica no ar num instante de tempo dt é dada pela Eq. (31) (ANSYS, 2017c).

$$\varepsilon \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_a \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] dVdt \quad (31)$$

Onde k_a representa o coeficiente de condução térmica do ar. Assim, é possível chegar ao balanço de energia para o ar de secagem, apresentado pela Eq. (32).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon \rho_a (c_a + c_v w) T] dVdt = & - \left[\rho_a v_x A_x (c_a + c_v w) \frac{\partial T}{\partial x} dx + \rho_a v_y A_y (c_a + c_v w) \frac{\partial T}{\partial y} dy \right] dt - \\ & ha(T - \theta) dVdt + \varepsilon \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_a \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] dVdt \end{aligned} \quad (32)$$

Simplificando a Eq. (32) e a enquadrando no formato CFD, pode-se chegar às Eqs. (33) a (35), onde E_a é a entalpia para o ar de secagem e $S_{h,a}$ é o termo fonte da equação. Uma equação semelhante para o ar de secagem é apresentada por Faghri et al. (2010), Nield e Bejan (2013) e ANSYS (2017c).

$$\frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon \rho_a E_a] + \nabla \cdot (\rho_a \vec{v} E_a) = \nabla \cdot (\varepsilon k_a \nabla T) + S_{h,a} \quad (33)$$

Onde:

$$E_a = (c_a + c_v w) T \quad (34)$$

$$S_{h,a} = -ha(T - \theta) \quad (35)$$

3.7. Conservação de energia para o leito de grãos

Após definida a equação para o balanço de energia para o ar de secagem, será definida a equação para o balanço de energia para o leito de grãos. A energia transferida por convecção do ar para o leito de grãos, dada pela Eq. (29), é igual ao calor necessário para aquecer os grãos, para evaporação da água contida nos grãos, e para aquecer o vapor de água extraído dos grãos (BROOKER et al., 1992). Assim, a entalpia necessária para evaporar a água contida nos grãos de um VC de volume dV ($edxdy$), conforme Figura 2, num instante dt é dada pela Eq. (36) e representa o resfriamento evaporativo, lembrando que a massa específica aparente do leito de grãos ρ_b é igual a $(1 - \varepsilon)\rho_g$.

$$(1 - \varepsilon)\rho_g h_{fg} \frac{\partial M}{\partial t} dV dt \quad (36)$$

Onde 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. (37).

$$h_{fg} = (3153518,6 - 2386,05T)(1 + 4,35e^{-28,25M}) \quad (37)$$

A entalpia necessária para aquecer o vapor de água extraído dos grãos de um VC num instante dt é dada pela Eq. (38).

$$(1 - \varepsilon)\rho_g c_v (T - \theta) \frac{\partial M}{\partial t} dV dt \quad (38)$$

A entalpia acumulada em cada VC devido ao aquecimento dos grãos num instante dt é dada pela Eq. (39).

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - \varepsilon)\rho_g (c_g + c_w M)\theta] dV dt \quad (39)$$

Onde c_g é o calor específico do grão e c_w é o calor específico da água. Como no balanço de energia para o ar, um termo difusivo também pode ser adicionado à equação do balanço de energia para o leito de grãos, representando a condução térmica no leito de grãos (THORPE, 2008; ROCHA et al., 2013; RANJBARAN et al. 2014). A condução térmica no leito de grãos num instante de tempo dt é dada pela Eq. (40).

$$(1 - \varepsilon) \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_g \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_g \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \right] dV dt \quad (40)$$

Onde k_g representa o coeficiente de condução térmica do grão de milho. Assim, através das Eqs. (29), (36) a (40) é possível chegar ao balanço de energia para o leito de grãos, apresentado pela Eq. (41).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(1 - \varepsilon) \rho_g (c_g + c_w M) \theta] dV dt = ha(T - \theta) dV dt + (1 - \varepsilon) \rho_g h_{fg} \frac{\partial M}{\partial t} dV dt + \\ (1 - \varepsilon) \rho_g c_v (T - \theta) \frac{\partial M}{\partial t} dV dt + (1 - \varepsilon) \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_g \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_g \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \right] dV dt \quad (41) \end{aligned}$$

Simplificando a Eq. (41) e enquadrando no formado CFD, pode-se chegar às Eq. (42) a (44), onde E_g é a entalpia para o leito de grãos e $S_{h,g}$ é o termo fonte da equação. Uma equação semelhante para o balanço de energia para o leito de grãos é apresentada por Faghri et al. (2010), Nield e Bejan (2013) e ANSYS (2017c).

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - \varepsilon) \rho_g E_g] = \nabla \cdot [(1 - \varepsilon) k_g \nabla \theta] + S_{h,g} \quad (42)$$

Onde:

$$E_g = (c_g + c_w M) \theta \quad (43)$$

$$S_{h,g} = ha(T - \theta) + [h_{fg} + c_v (T - \theta)] (1 - \varepsilon) \rho_g \frac{\partial M}{\partial t} \quad (44)$$

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.

3.8. Equações de propriedade para o ar e para o milho

As propriedades termodinâmicas para o ar de secagem são estimadas pelas Eqs. (45) a (49) (PAKOWSKI et al., 1991; BROOKER et al., 1992; FORTES, et al., 2006).

$$\rho_a = \frac{0,6219 \cdot P_{atm}}{287 \cdot T(0,6219 + w)} \quad (45)$$

$$\mu_a = 1,691 \cdot 10^{-5} + 4,984 \cdot 10^{-8}(T - 273,15) - 3,187 \cdot 10^{-11}(T - 273,15)^2 + 1,319 \cdot 10^{-14}(T - 273,15)^3 \quad (46)$$

$$c_a = 1009,26 - 4,0403 \cdot 10^{-3}(T - 273,15) + 6,1759 \cdot 10^{-4}(T - 273,15)^2 - 4,097 \cdot 10^{-7}(T - 273,15)^3 \quad (47)$$

$$c_v = 1883 - 1,6737 \cdot 10^{-1}T + 8,439 \cdot 10^{-4}T^2 - 2,6967 \cdot 10^{-7}T^3 \quad (48)$$

$$k_a = 7,331 \cdot 10^{-5}T + 0,004071 \quad (49)$$

Onde ρ_a é a massa específica do ar, μ_a é a viscosidade do ar, c_a é o calor específico do ar seco, c_v é o calor específico do vapor de água, k_a é a condutividade térmica do ar, w é a umidade absoluta do ar, T é a temperatura absoluta do ar de secagem e P_{atm} é a pressão atmosférica. Já as propriedades para o leito de grãos são definidas pelas Eqs. (50) a (53) (LASSERAN, 1978; ANDRADE et al., 2004).

$$\rho_g = \frac{\rho_b}{(1-\varepsilon)} = \frac{702,76 + 595,71\left(\frac{M}{1+M}\right) - 3434\left(\frac{M}{1+M}\right)^2}{(1-\varepsilon)} \quad (50)$$

$$\varepsilon = 0,39 + 0,095M \quad (51)$$

$$(c_g + c_w M) = 1132,7 + 5445,3\left(\frac{M}{1+M}\right) \quad (52)$$

$$k_g = 0,10473 + 0,434\left(\frac{M}{1+M}\right) \quad (53)$$

Onde ρ_g , c_g e k_g são respectivamente a massa específica, o calor específico e a condutividade térmica do grão de milho, ρ_b , ε e M representam respectivamente a massa específica aparente, a porosidade e o teor de umidade em bulbo seco do leito de grãos e c_w é o calor específico da água líquida. Nota-se que a Eq. (52) representa o termo $(c_g + c_w M)$ da entalpia para o leito de grãos E_g , dada pela Eq. (43), e leva em consideração o calor específico do grão de milho seco e o calor específico da água contida nos grãos.

3.9. Condições iniciais e de contorno

Para solução do modelo matemático proposto, algumas condições iniciais e de contorno devem ser definidas. As seguintes propriedades do ar intergranular e do leito de grãos são estabelecidas no início do processo de secagem, ou seja, para um tempo de simulação $t = 0s$:

- Umidade absoluta inicial do ar intergranular: w_0 ;
- Temperatura inicial do ar intergranular: T_0 ;
- Teor de umidade inicial do leito de grãos: M_0 ;
- Temperatura inicial do leito de grãos: θ_0 ;

Têm-se ainda as seguintes condições de contorno para o secador, para um tempo de simulação $t > 0s$:

- Umidade absoluta na entrada do secador: w_{in} ;

- Temperatura do ar de secagem na entrada do secador: T_{in} ;
- Velocidade ou pressão do ar na entrada do secador: v_{in} (para o modelo de escoamento de ar unidimensional) e P_{in} (para o modelo de escoamento de ar bidimensional);
- Pressão atmosférica na saída do secador: P_{atm} ;

3.10. Análise energética e exergética de secagem

Dincer e Sahin (2004) apresentam uma análise termodinâmica do processo de secagem, onde são demonstrados os balanços de energia e exergia, assim como o cálculo das eficiências energéticas e exergéticas do processo de secagem de uma forma global. Amantéa et al. (2013) propõem um modelo para cálculo da eficiência energética e exergética levando em consideração as variações temporais no processo de secagem. Dessa forma, Ranjbaran e Zare (2013) definem eficiência energética do processo de secagem η_e através da Eq. (54). É importante frizar que a presente definição de eficiência energética foca apenas na secagem da umidade contida nos grãos, e não leva em consideração o gasto de energia para aumento da temperatura da água evaporada e dos grãos.

$$\eta_e = \frac{\text{energia demandada para evaporar a umidade contida nos grãos}}{\text{energia que entra no sistema pelo ar de secagem}} \quad (54)$$

Amantéa et al. (2013) e Ranjbaran et al. (2014) apresentam um modelo de cálculo da eficiência energética entre um intervalo de tempo t até $t + \Delta t$, onde a energia demandada para evaporar a umidade equivale à somatória das energias demandadas para cada um dos VC do leito de grãos. Assim, a eficiência energética pode ser expressa através das Eqs. (55) e (56), onde V é o volume de todo o leito de grãos, δV é o volume de cada VC, $\dot{E}_{a,in}$ é a taxa de entalpia que entra pelo ar de secagem, n é o número total de VC do leito de grãos, $\dot{m}_{a,in}$ é a vazão mássica do ar de secagem na entrada e $T_{a,in}$ é a temperatura do ar de secagem na entrada.

$$\eta_e = \frac{\int_t^{t+\Delta t} \int_0^V (1-\varepsilon) \rho_g \frac{\partial M}{\partial t} h_{fg} dV dt}{\int_t^{t+\Delta t} \dot{E}_{a,in} dt} = \frac{\sum_{i=1}^n [(1-\varepsilon) \rho_g \frac{\partial M}{\partial t} h_{fg} \delta V]_i \Delta t}{\dot{E}_{a,in} \Delta t} \quad (55)$$

$$\dot{E}_{a,in} = \dot{m}_{a,in} (c_a + c_v w_{in}) (T_{a,in} - T_{00}) \quad (56)$$

Um estado de referência para as propriedades termodinâmicas deve ser definido a fim de se conseguir comparar eficiências para diferentes processos com diferentes condições ambientes. Esse estado de referência será demarcado com o subscrito “00”, e representa o estado morto, ou seja, estado em que um sistema está em equilíbrio termodinâmico com o ambiente (ÇENGEL e BOLES, 2013). Ainda não há um consenso entre os autores a respeito do estado morto, de forma que cada trabalho possui propriedades diferentes para este estado. Amantéa et al. (2013) definem o estado morto como $T_{00} = 298,15\text{K}$, $P_{00} = 101325\text{Pa}$, $w_{00} = 0,011921\text{kg/kg}$ e $RH_{00} = 0,60$.

Wark (1995) e Bejan (2006) definem a exergia total molar $\bar{\psi}$ dos processos psicrométricos (misturas) de acordo com a Eq. (57), onde são incluídos termos para o equilíbrio físico e químico.

$$\bar{\psi} = \bar{\psi}_{física} + \bar{\psi}_{química} = \sum_i y_i (\bar{h}_i - T_{00} \bar{s}_i - \bar{\mu}_{i,00}) \quad (57)$$

Onde y representa a fração molar do i -ésimo componente, \bar{h} é a entalpia molar parcial, \bar{s} é a entropia molar parcial e $\bar{\mu}_{00}$ é o potencial químico molar. Considerando que o ar de secagem é constituído por uma mistura de ar seco mais vapor de água, e que este se comporta como um gás ideal, a exergia específica total do escoamento do ar de secagem pode ser expresso de acordo com a Eq. (58) (DINCER e SAHIN, 2004; BEJAN, 2006; AMANTÉA et al., 2013).

$$\Delta\psi = (c_a + c_v w_{in}) \left(T_{a,in} - T_{00} - T_{00} \ln \frac{T_{a,in}}{T_{00}} \right) + (1 + 1,608 w_{in}) R_a T_{00} \ln \frac{P_{a,in}}{P_{00}} + R_a T_{00} \left[(1 + 1,608 w_{in}) \ln \left(\frac{1 + 1,608 w_{00}}{1 + 1,608 w_{in}} \right) + 1,608 w_{in} \ln \left(\frac{1,608 w_{in}}{1,608 w_{00}} \right) \right] \quad (58)$$

Onde R_a é a constante universal dos gases específica para o ar, expressa como $287 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Nota-se que agora a exergia não é mais expressa na base molar, e sim por quilograma de ar seco. Os dois primeiros termos da equação representam a exergia física, enquanto o último termo representa a exergia química.

A eficiência exergética do processo de secagem η_{ex} é definida por Ranjbaran e Zare (2013) através da Eq. (59).

$$\eta_{ex} = \frac{\text{exergia demandada para evaporar a umidade contida nos grãos}}{\text{exergia que entra no sistema pelo ar de secagem}} \quad (59)$$

De forma semelhante à eficiência energética, Amantéa et al. (2013) e Ranjbaran et al. (2014) apresentam nas Eqs. (60) e (61) um modelo de cálculo para eficiência exergética entre um intervalo de tempo t até $t + \Delta t$, onde a exergia demandada para evaporar a umidade equivale à somatória das exergias demandadas para cada um dos VC do leito de grãos.

$$\eta_{ex} = \frac{\int_t^{t+\Delta t} \int_0^V \left(1 - \frac{T_{00}}{T}\right) (1-\varepsilon) \rho_g \frac{\partial M}{\partial t} h_{fg} dV dt}{\int_t^{t+\Delta t} \dot{E}x_{a,in} dt} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(1 - \frac{T_{00}}{T}\right) (1-\varepsilon) \rho_g \frac{\partial M}{\partial t} h_{fg} \delta V \right]_i \Delta t}{\dot{E}x_{a,in} \Delta t} \quad (60)$$

$$\dot{E}x_{a,in} = \dot{m}_{a,in} \Delta \psi \quad (61)$$

Os termos $\dot{E}_{a,in}$ e $\dot{E}x_{a,in}$ referem-se respectivamente às taxas de energia e exergia disponíveis no ar de secagem na entrada, e originam-se da energia térmica gerada pela queima de um combustível ou pelo uso de eletricidade, e ainda da energia mecânica gerada pelo insuflamento de ar pelo ventilador.

Vale lembrar que as eficiências energéticas e exergéticas abordadas neste trabalho focam apenas na eficiência de secagem da umidade contida nos grãos. Neste trabalho não é abordado o tema da eficiência de transformação de energia da fonte térmica, e considera-se que toda energia gerada por esta fonte é convertida em calor de modo a ser aproveitado integralmente pelo ar de secagem. Caso as eficiências de transformação de energia do processo de secagem como um todo fossem consideradas, as eficiências energéticas e exergéticas apresentariam valores muito inferiores aos apresentados neste trabalho, uma vez

que as perdas de energia ao longo do processo global de secagem são muito significativas, em grande parte devido às perdas de energia térmica (UTLU et al., 2011). O conceito de eficiência global de um sistema é abordado na emergia, termo que está relacionado a toda energia necessária para um ecossistema produzir um recurso, ou ainda a toda energia útil de um determinado tipo que é utilizada diretamente ou indiretamente nas transformações necessárias para gerar um produto ou serviço (ODUM, 1996; BROWN; ULGIATI, 2004).

4. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

O modelo matemático descrito no presente trabalho foi implementado utilizando o software *ANSYS Fluent 18.0*. A ferramenta para customização do software *User-Defined Function* (UDF) foi utilizada para realizar algumas tarefas adicionais. No APÊNDICE A é demonstrado o passo a passo utilizado para construção do modelo no software.

A resolução de um modelo matemático no *ANSYS Fluent 18.0* segue alguns passos. São eles (ANSYS, 2017a):

- Divisão do domínio em volumes discretos, ou Volumes de Controle (VC), usando uma malha computacional;
- Integração das equações governantes nos VC individuais para a construção de um sistema de equações algébricas para as variáveis dependentes de interesse;
- Linearização das equações discretizadas e solução do sistema de equações lineares resultantes a fim de atualizar as variáveis dependentes.

Tratando-se da divisão do domínio do problema em VC, estes podem ser denominados também como células (*cells*), representam a menor divisão do problema estudado e são compostas por nós (*nodes*) em cada uma de suas extremidades. Um conjunto de células é chamado de zona (*thread*), e um conjunto de zonas é chamado de domínio (*domain*). Cada célula é formada por uma série de Superfícies de Controle (SC), denominadas faces (*faces*), e por uma série de arestas (*edges*). Um esquema de uma célula bidimensional é apresentado na Figura 3.

Figura 3. Esquema de uma célula bidimensional.



Fonte: ANSYS, 2017b.

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 EDP's 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 (ANSYS, 2017c).

4.1. Discretização e solução do modelo

As Equações Diferenciais Parciais (EDP) 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 conforme Figura 2. Segundo Versteeg e Malalasekera (2007) e Maliska (2010), as equações de conservação em formato diferencial e no sistema de coordenadas cartesianas para o MVF podem ser escritas de forma geral de acordo com a Eq. (62).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_{\phi} \quad (62)$$

Onde ϕ é a propriedade de interesse, ρ é a massa específica de um VC e Γ é o coeficiente difusivo. O primeiro termo à esquerda da equação é o temporal e representa a variação da propriedade ϕ no tempo. O segundo termo à esquerda da equação retrata o balanço advectivo da variável ϕ nas direções coordenadas x e y . O primeiro termo à direita da equação descreve o balanço dos fluxos difusivos nas direções coordenadas x e y . Já o segundo termo à direita da equação exprime o termo fonte, responsável por acomodar todos aqueles termos que não se encaixam na forma apresentada da equação.

Assim, pelo MVF é feita a integração de cada uma das equações governantes, descritas na forma geral pela Eq. (62), para todos os VC, de acordo com a Eq. (63), obtendo como resultado a Eq. (64), onde dV é o volume diferencial de cada célula, \vec{A} é o vetor área da SC

para cada uma das faces das células e f é o número de faces de cada célula, que geralmente no interior do domínio são 4 para uma geometria bidimensional. Nas bordas do domínio o número de faces para cada célula pode ser diferente (MALISKA, 2010; ANSYS, 2017a).

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) dV + \oint_A (\rho\vec{v}\phi) d\vec{A} = \oint_A (\Gamma\nabla\phi) d\vec{A} + \oint_V S_\phi dV \quad (63)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi)V + \sum_{i=1}^f (\rho v\phi)_i A_i = \sum_{i=1}^f (\Gamma\nabla\phi)_i A_i + S_\phi V \quad (64)$$

Deve-se tomar um cuidado especial com o termo fonte, já que muitas vezes importantes termos são deslocados para esse campo. Para evitar que o processo de solução do sistema de equações divirja, comumente é realizada a linearização do termo fonte (MALISKA, 2010). Segundo ANSYS (2017b, c), a linearização do termo fonte aumenta a estabilidade da solução e ajuda na sua convergência, e para escoamentos em regime transiente essa permite a utilização de maiores intervalos de tempos entre uma e outra iteração e maiores fatores de sub-relaxamento. Dessa forma, o termo fonte linearizado pode ser expresso de acordo com a Eq. (65).

$$S_\phi = S_c + S_p \phi_P \quad (65)$$

Onde S_c é a parte explícita do termo fonte (ou constante), dada pela Eq. (66), e S_p é a parte implícita (ou linear), dada pela Eq. (67). O símbolo sobrescrito * representa os valores referentes à última iteração convergida.

$$S_c = S_\phi^* - \left(\frac{\partial S_\phi}{\partial \phi_P} \right)^* \phi_P^* \quad (66)$$

$$S_p = \left(\frac{\partial S_\phi}{\partial \phi_P} \right)^* \quad (67)$$

A Eq. (64) discretizada contém a variável de interesse desconhecida ϕ no centro de cada célula do domínio, bem como os valores desconhecidos nos centros das células circundantes adjacentes (células vizinhas). Esta equação é, em geral, não linear com relação a essas variáveis. Patankar (1980) e Maliska (2010) apresentam uma forma linearizada da Eq. (64), escrita de acordo com as Eqs. (68) a (72).

$$A_P \phi_P = \sum_{i=1}^f (A_{nb} \phi_{nb})_i + B_P \quad (68)$$

Onde:

$$A_{nb} = D_{nb} \left(\frac{Pe_{nb}}{e^{Pe_{nb}} - 1} \right) + \max[\pm F_{nb}, 0] \quad (69)$$

$$A_P = \sum_{i=1}^f (A_{nb})_i + \frac{\rho e \Delta x \Delta y}{\Delta t} - S_P e \Delta x \Delta y \quad (70)$$

$$B_P = A_P^* \phi_P^* + S_C e \Delta x \Delta y \quad (71)$$

$$A_P^* = \frac{\rho^* e \Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (72)$$

Onde A e B são coeficientes linearizados e Δx e Δy são as distâncias entre o centro das células presentes até o centro das células vizinhas. O subscrito P refere-se à célula presente a ser analisada, enquanto o subscrito nb refere-se às células vizinhas. As taxas de fluxo F_{nb} , condutância D_{nb} e números de Peclet Pe_{nb} são definidos pelas Eqs. (73) a (75), respectivamente.

$$F_{nb} = (\rho v)_{nb} A_{x,y} \quad (73)$$

$$D_{nb} = \frac{\Gamma_{nb} A_{x,y}}{L_{nb}} \quad (74)$$

$$Pe_{nb} = \frac{F_{nb}}{D_{nb}} \quad (75)$$

Onde $A_{x,y}$ é a área da SC, e representa $A_x (e\Delta y)$ ou $A_y (e\Delta x)$, L é comprimento entre o centro da célula presente e o centro da célula vizinha, e representa Δx ou Δy .

A discretização do modelo apresentada acima é uma simplificação da técnica de discretização do MVF utilizada pelo *ANSYS Fluent 18.0* para uma equação de conservação qualquer. Foram utilizadas ainda algumas técnicas de discretização adicionais descritas em Patankar (1980), Versteeg e Malalasekera (2007), Maliska (2010) e ANSYS (2017a). São elas:

- *SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)*: algoritmo utilizado para tratamento do acoplamento pressão-velocidade das equações de quantidade de movimento, a fim de reforçar a equação de conservação de massa e obter o campo de pressão;
- *Second-Order Implicit Method*: técnica para discretização do termo transiente;
- *Second-Order Upwind Scheme*: técnica utilizada para discretização espacial dos termos advectivos e difusivos das equações de conservação, de modo a minimizar as oscilações numéricas;
- *Least Squares Cell-Based Gradient Evaluation*: técnica para discretização do operador gradiente ∇ de uma variável de interesse ϕ ;

Todas estas técnicas mencionadas acima foram utilizadas para discretização das equações de conservação por aumentarem a precisão dos resultados. Tais técnicas também foram utilizadas por Ranjbaran et al. (2014).

Sabe-se que as EDP's de grande parte dos modelos de secagem contidos na literatura, incluindo o modelo proposto neste trabalho, possuem um comportamento altamente (ou até puramente) advectivo e por consequência um alto valor de Peclet, o que significa que as taxas advectivas de certa grandeza física são muito superiores às taxas difusivas desta mesma grandeza. Por causa disso, muitos autores desconsideram os fluxos difusivos tanto de umidade quanto de calor nos modelos de secagem de grãos, justamente pelo fato de que os fluxos difusivos são inexpressivos comparados com os fluxos advectivos (BROOKER et al., 1974; MARTINS et al., 1982; SHARP, 1982; FRANÇA et al., 1994; SOUZA, 1996;

SRIVASTAVA; JOHN, 2002; ZARE et al, 2006; NAGHAVI et al., 2010;. Para altos valores de Peclet é aconselhável a utilização da técnica *Upwind* de discretização espacial dos termos advectivos e difusivos, a fim de se minimizar as oscilações numéricas (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007; MALISKA, 2010).

Após discretização e linearização do modelo matemático, tem-se como resultado um sistema de equações algébricas em forma de matriz de coeficientes. O software *ANSYS Fluent 18.0* resolve o sistema de equações através do método iterativo ponto a ponto e implícito Gauss-Seidel, em conjunto com o método algébrico *Multigrid* (AMG) (ANSYS, 2017a).

Segundo Maliska (2010), o método de Gauss-Seidel resolve o sistema de equações visitando equação por equação, iterativamente, usando os valores das variáveis de interesse ϕ do nível iterativo anterior. Esse método faz o uso ainda, durante um mesmo ciclo iterativo, de valores das variáveis de interesse já calculadas nesse ciclo, a fim de acelerar a convergência. Já o método *Multigrid* (AMG) é utilizado para auxiliar na convergência dos sistemas de equações e conseqüentemente diminuir o tempo de simulação.

A cada iteração é calculado um resíduo ξ para cada uma das equações de governo discretizadas, de modo que essas iterações terminam quando requisitos pré-estabelecidos para os resíduos são alcançados, passando para o próximo passo no tempo. Tal resíduo é calculado pela Eq. (76), através do somatório do resíduo de todas as células do domínio da solução.

$$\xi = \sqrt{\sum (B_P + \sum_{i=1}^n A_{nb} \phi_{nb} - A_P \phi_P)^2} \quad (76)$$

O *ANSYS Fluent 18.0* ainda utiliza fatores de relaxamento para melhorar a convergência das iterações. Segundo ANSYS (2017c), os fatores de relaxamento padrões podem ser muito agressivos para alguns problemas, especialmente no começo do cálculo. Esse fator pode fazer a solução avançar mais rapidamente, quando o processo está lento, ou segurá-la, quando essa está muito avançada e pode chegar a divergir (MALISKA, 2010). O fator de relaxamento r se relaciona com a variável de interesse ϕ de acordo com a Eq. (77).

$$\phi_P = r \phi_P + (1 - r) \phi_P^* \quad (77)$$

A Tabela 1 relaciona os termos da Eq. (62) geral para o MVF com os termos correspondentes para cada equação de conservação a ser resolvida nesse trabalho.

Tabela 1. Discriminação dos termos das equações de conservação.

Equação de conservação	ϕ	ε	ρ	\vec{v}	Γ	S_ϕ
Massa (ar)	-	ε	ρ_a	\vec{v}	-	-
Quantidade de movimento (ar)	\vec{v}	ε	ρ_a	\vec{v}	μ_a	$-\nabla P + \rho_a \vec{g} - \left(\frac{\mu_a}{\alpha} \vec{v} + C_2 \frac{1}{2} \rho_a \vec{v}^2 \right)$
Umidade (ar)	w	ε	ρ_a	\vec{v}	$\rho_a D_{eff}$	$-(1 - \varepsilon) \rho_g \frac{\partial M}{\partial t}$
Umidade (leito de grãos)	M	-	-	-	-	$\frac{M_e - M}{3600 \sqrt{A^2 + \left(\frac{1}{900} \right) Bt}}$
Energia (ar)	E_a	ε	ρ_a	\vec{v}	$\frac{\varepsilon k_a}{c_a}$	$-ha(T - \theta)$
Energia (leito de grãos)	E_g	$(1 - \varepsilon)$	ρ_g	-	$\frac{(1 - \varepsilon) k_g}{c_g}$	$ha(T - \theta) + [h_{fg} + c_v(T - \theta)](1 - \varepsilon) \rho_g \frac{\partial M}{\partial t}$

Fonte: elaborado pelo autor.

4.2. 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;
- Calcular as eficiências energéticas e exergéticas da secagem ao longo do tempo.

O software *ANSYS Fluent 18.0* possui algumas macros pré-estabelecidas que podem ser utilizadas para criação da UDF (ANSYS, 2017b). Para este trabalho, foi criada uma UDF utilizando como base as obras de Thorpe (2008) e Ranjbaran et al. (2014). No APÊNDICE B são apresentadas algumas das macros utilizadas nesse trabalho e suas aplicações. No APÊNDICE C é apresentada a estrutura completa da UDF escrita em linguagem C.

O software *ANSYS Fluent 18.0* permite a criação e utilização de novas equações de conservação em formato CFD, semelhantes à Eq. (62), e estas são definidas como *User-Defined Scalar* (UDS). Nesse trabalho foi adicionada uma UDS para representar o balanço de umidade para o ar, Eq. (17), identificada nesta UDF pela macro $C_UDSI(c, t, 0)$. Já as demais equações de conservação foram empregadas utilizando os próprios modelos disponíveis no *ANSYS Fluent 18.0*.

O software também permite guardar algumas variáveis em memórias para um posterior acesso. Tais memórias são definidas como *User-Defined Memory* (UDM), e neste trabalho guardam diversas informações para cada uma das células do domínio para cada passo no tempo, como por exemplo, o valor do teor de umidade do leito de grãos M , $C_UDMI(c, t, 0)$, o valor da variação do teor de umidade do leito de grãos $\frac{\partial M}{\partial t}$, $C_UDMI(c, t, 1)$, o valor da umidade relativa do ar RH , $C_UDMI(c, t, 2)$, etc. O restante das UDM estão identificadas no APÊNDICE C.

Foi utilizada a macro `DEFINE_INIT` para definir as condições iniciais do problema, tais como teor de umidade e temperatura do leito de grãos e temperatura, umidade relativa e umidade absoluta do ar intergranular. Normalmente no processo de secagem de grãos os dados de entrada temperatura e umidade do leito de grãos e temperatura do ar intergranular são obtidos através de medições. Já as umidades absoluta e relativa do ar intergranular devem ser calculadas. Thorpe (2008) inicializa seu modelo matemático utilizando a equação de umidade de equilíbrio para obter o valor inicial para umidade relativa RH_0 do ar intergranular, considerando que o leito de grãos inicial está em equilíbrio de umidade com o ar intergranular. Dessa forma, isolando o termo RH na Eq. (22), é possível chegar ao valor da umidade relativa inicial do ar intergranular, dado pela Eq. (78), onde M_0 é o teor de umidade inicial do leito de grãos e T_0 é a temperatura inicial do ar. Isolando o termo w da Eq. (23), é possível chegar ao valor da umidade absoluta inicial do ar intergranular, de acordo com a Eq. (79), onde P_{atm} é a pressão atmosférica e P_{vs} é a pressão de vapor de saturação (Eq. (24)) para uma temperatura T_0 .

$$RH_0 = 1 - e^{-0,688(T_0-227)M_0^2} \quad (78)$$

$$w_0 = \frac{0,62189 \cdot RH_0 \cdot P_{vs}}{P_{atm} - RH_0 \cdot P_{vs}} \quad (79)$$

Outra importante macro utilizada foi a DEFINE_ADJUST para atualização do teor de umidade do leito de grãos M a cada intervalo de tempo para cada célula computacional do domínio e para o cálculo da eficiência energética e exergetica da secagem ao longo do tempo. O valor do teor de umidade do leito de grãos atualizado M foi calculado através da Eq. (80), onde $\frac{\partial M}{\partial t}$ pode ser obtido pela Eq. (19) e Δt é o intervalo no tempo de integração. O símbolo sobrescrito * representa o valor referente à última iteração convergida.

$$M = M^* + \frac{\partial M}{\partial t} \Delta t \quad (80)$$

O software *ANSYS Fluent 18.0* tem uma limitação no cálculo do calor específico através da macro DEFINE_SPECIFIC_HEAT, e só permite que essa propriedade seja calculada em função da temperatura ou do tempo, o que pode ser constatado também em Thorpe (2008). Como os calores específicos para o ar úmido ($c_a + c_v w$) e para o milho ($c_g + c_w M$) dependem também da umidade absoluta do ar w e do teor de umidade do leito de grãos M , fez-se um ajuste polinomial dos valores médios de w em função do tempo t e de M em função do tempo t para o cálculo dos calores específicos acima mencionados. Este procedimento é discutido no capítulo 6.

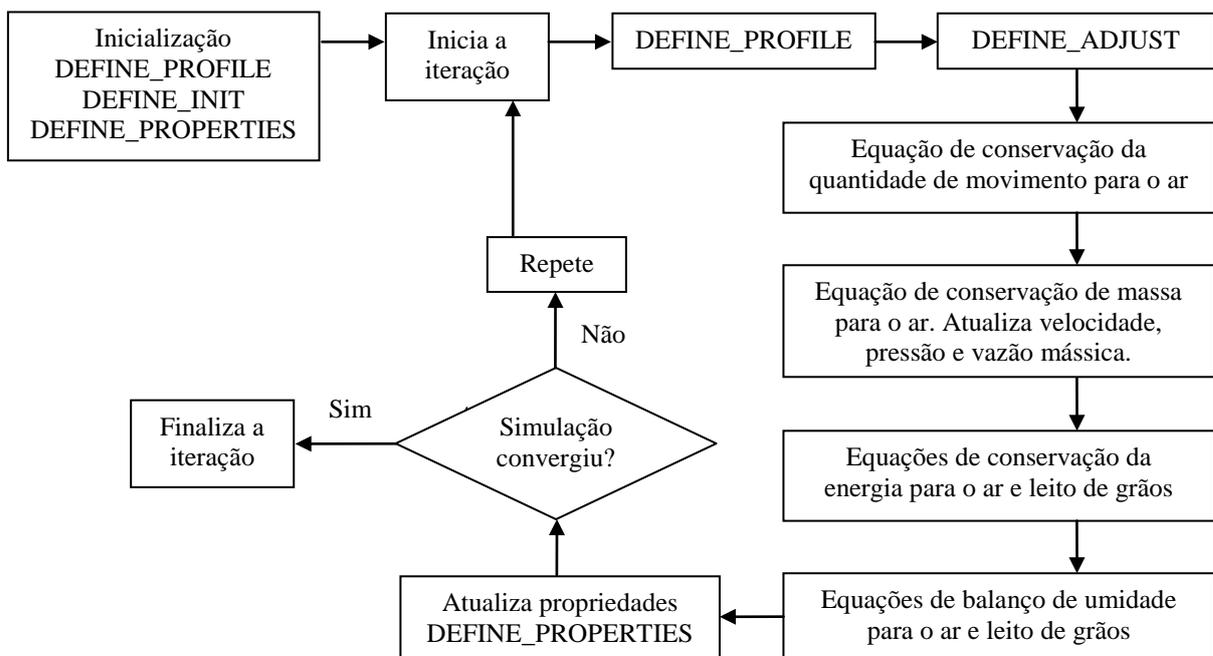
4.3. Procedimento iterativo

O modelo matemático proposto foi solucionado utilizando o solucionador segregado baseado na pressão, ou *Pressure-Based Segregated Solver* (ANSYS, 2017b). Historicamente falando, tem sido adotado como boas práticas utilizar este tipo de solucionador para resolver problemas de CFD com escoamentos incompressíveis (ou levemente compressíveis) e a baixas velocidades, o que se enquadra no problema deste presente trabalho (MERKLE et al.,

1992; MOUKALLED; DARWISH, 2001). Além disso, outros autores também o utilizaram para solucionar escoamentos com características semelhantes ao escoamento apresentado neste presente trabalho, que é o caso de Ranjbaran e Zare (2012) e Ranjbaran et al. (2014).

Neste solucionador, o software resolve o modelo através de um método de iterações, onde critérios de convergência devem ser alcançados. Na Figura 4 apresenta-se o procedimento de solução das iterações do modelo matemático, onde este é executado para cada passo no tempo. A primeira etapa se dá pela inicialização do modelo, onde o software carrega as condições iniciais e de contorno, e também chama as macros DEFINE_PROFILE, DEFINE_INIT e DEFINE_PROPERTIES, caso esta seja a primeira iteração da simulação. A partir da segunda iteração, apenas as macros DEFINE_PROFILE e DEFINE_PROPERTIES são chamadas no início da iteração. O ciclo de iterações se inicia então pela execução das macros DEFINE_PROFILE e DEFINE_ADJUST. Em seguida as equações de conservação são resolvidas, sendo que as macros DEFINE_SOURCE são chamadas, se houverem, para cada uma destas equações. Por fim, as propriedades são atualizadas e a convergência da iteração é verificada. Caso os critérios de convergência forem alcançados, a iteração finaliza. Caso contrário, uma nova iteração se inicia.

Figura 4. Procedimento de solução do modelo matemático.



Fonte: elaborado pelo autor.

5. VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático proposto foi validado utilizando um modelo de secador com escoamento de ar unidimensional, onde foram utilizados dados de referência presentes em Martins et al. (1982). A Tabela 2 apresenta as condições iniciais e de contorno para 7 testes de secagem experimentais apresentados por Martins et al. (1982). A pressão atmosférica foi considerada como 101325Pa, o escoamento de ar foi definido como laminar e foi utilizada uma aceleração da gravidade de $9,81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.

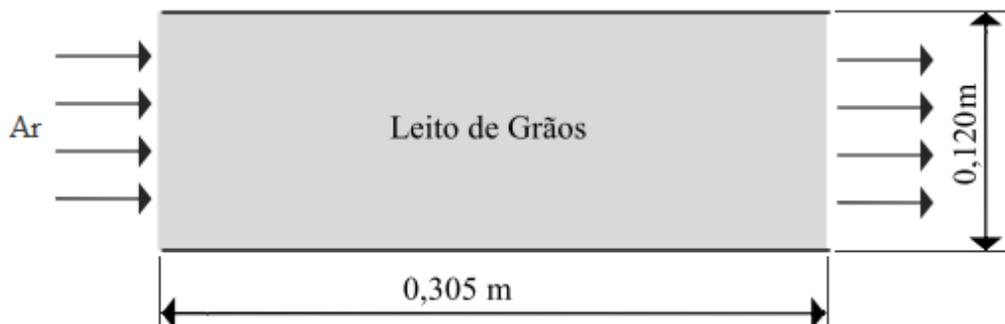
Tabela 2. Condições iniciais e de contorno do modelo de secagem unidimensional.

Teste	T_{in} [K]	v_{in} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	RH_{in} [-]	w_{in} [$\text{kg}_{\text{água}}\cdot\text{kg}_{\text{gar seco}}^{-1}$]	T_0 [K]	θ_0 [K]	M_0 [$\text{kg}_{\text{água}}\cdot\text{kg}_{\text{produto seco}}^{-1}$]
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.

O secador com escoamento de ar unidimensional do trabalho de Martins et al. (1982) possui as geometrias conforme a Figura 5. A malha computacional foi gerada através do gerador de malhas GAMBIT do *ANSYS Fluent 18.0* (ANSYS, 2017d).

Figura 5. Geometria do secador com escoamento de ar unidimensional.



Fonte: SOUZA, 1996.

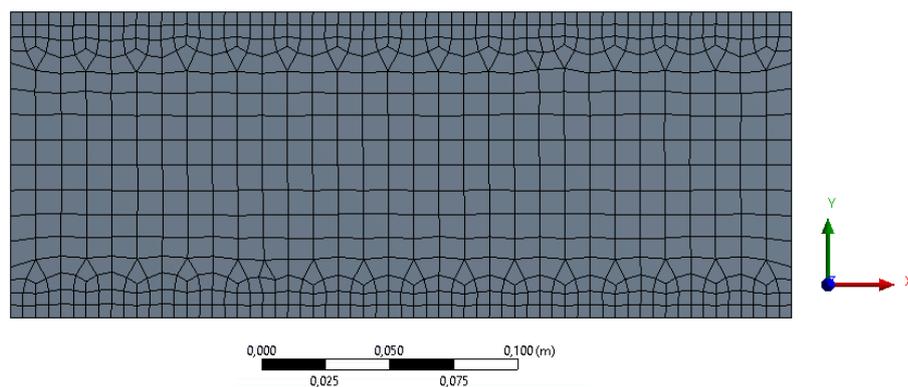
Os resultados experimentais apresentados por Martins et al. (1982) foram comparados com os resultados numéricos obtidos neste trabalho através do Erro Relativo percentual ($ER_{\%}$), definido pela Eq. (81). Os resultados numéricos obtidos por diferentes autores também foram comparados com os resultados numéricos atingidos pelo presente trabalho através do Desvio Padrão Relativo percentual ($DPR_{\%}$), definido pela Eq. (82). Esta última comparação entre resultados numéricos está apresentada no capítulo 6.

$$ER_{\%} = \frac{|\phi_{exp,i} - \phi_{num,i}|}{\phi_{exp,i}} \cdot 100 \quad (81)$$

$$DPR_{\%} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\phi_{num,i} - \phi_{comp,i}}{\phi_{num,i}} \right)^2} \cdot 100 \quad (82)$$

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 $i = 1, 2, 3, \dots$

Figura 6. Malha computacional do secador com escoamento de ar unidimensional.



Fonte: elaborado pelo autor.

A malha computacional da geometria mostrada na Figura 6 foi gerada utilizando uma malha híbrida com predominância de elementos quadriláteros, com refinamento de malha nas bordas do secador. Foi utilizado um número total de 714 elementos, resultando em um

número de 2297 nós, com o tamanho máximo de face de 0,010m e tamanho mínimo de face de 0,001m. As simulações foram feitas com um passo no tempo Δt de 1s. Um estudo de tamanho de malha e avanço no tempo foi feito utilizando diferentes tamanhos máximos de face para os VC (0,010m e 714 elementos; 0,005m e 2136 elementos; e 0,002m e 10864 elementos) e diferentes avanços no tempo (1,0s, 0,5s e 0,1s), obtendo resultados muito próximos, com diferenças inexpressivas.

Em relação à qualidade da malha da geometria com escoamento de ar unidimensional, esta apresentou uma qualidade ortogonal inversa mínima (*Minimum Inverse Orthogonal Quality*) igual a 0,193 e, segundo ANSYS (2017d), pode ser classificada como excelente. Outros parâmetros de qualidade de malha também foram investigados, sendo eles: *aspect ratio* igual a 2,866 e *cell growth factor* igual a 1,000. De acordo com Ranjbaran e Zare (2012), os valores desses três parâmetros não podem ser superiores a 0,500, 5,000 e 1,100, respectivamente, o que foi atendido.

Na Tabela 3 é apresentada 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

* Dados experimentais retirados do trabalho de Martins et al. (1982). Não há informações a respeito dos valores das incertezas das medições.

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.

Levantou-se a hipótese de que outro fator de erro poderia ter relação com imprecisões na solução numérica devido à utilização dos termos difusivos nas EDP's do modelo matemático do presente trabalho. Como já mencionado na seção 4.1, grande parte dos autores despreza os fluxos difusivos tanto das equações de transferência de umidade quanto das equações de transferência de calor dos modelos matemáticos de secagem, pelo fato destes serem inexpressivos comparados aos fluxos advectivos. No presente trabalho tais termos difusivos foram considerados pelo fato de que outros autores em estudos recentes também os consideraram (THORPE, 2008; FAGHRI et al., 2010; NIELD; BEJAN, 2013; RANJBARAN et al., 2014). Fez-se então outra simulação utilizando os mesmos parâmetros da Tabela 2, porém desprezando os termos difusivos das equações de balanço de umidade para o ar (Eq. (17)), conservação de energia para o ar (Eq. (33)) e conservação de energia para o leito de grãos (Eq. (42)). Os valores de teor de umidade médio do leito de grãos para os devidos tempos de secagem, conforme Tabela 3, foram comparados entre as duas simulações (uma considerando o modelo com termos difusivos nas equações de conservação e outra desconsiderando os termos difusivos das equações do modelo), onde foram obtidas diferenças irrisórias menores do que 0,5%. Desta forma, verificou-se que este não foi um motivo de erro que tenha levado a um distanciamento entre os valores calculados e experimentais.

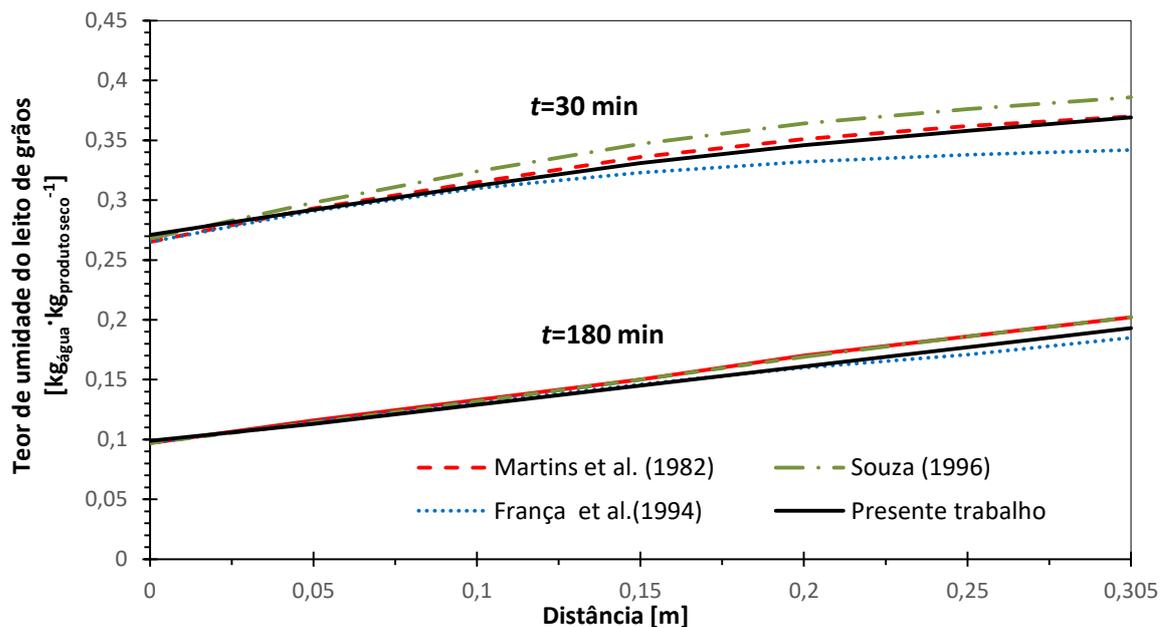
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Modelo de escoamento de ar unidimensional

Além da validação apresentada no capítulo 5, foi feita também uma comparação dos resultados obtidos pela simulação numérica do Teste 1 (Tabela 2) do modelo de escoamento de ar unidimensional, apresenta por Martins et al. (1982), França et al. (1994) e Souza (1996), com os resultados obtidos pela solução do modelo matemático do presente trabalho. Nas Figuras 7, 8 e 9 são apresentadas, respectivamente, a comparação do teor de umidade do leito de grãos M em função do comprimento do secador, a comparação da temperatura do leito de grãos θ em função do comprimento do secador, para dois tempos distintos, e a comparação do teor de umidade médio do leito de grãos \bar{M} em função do tempo t .

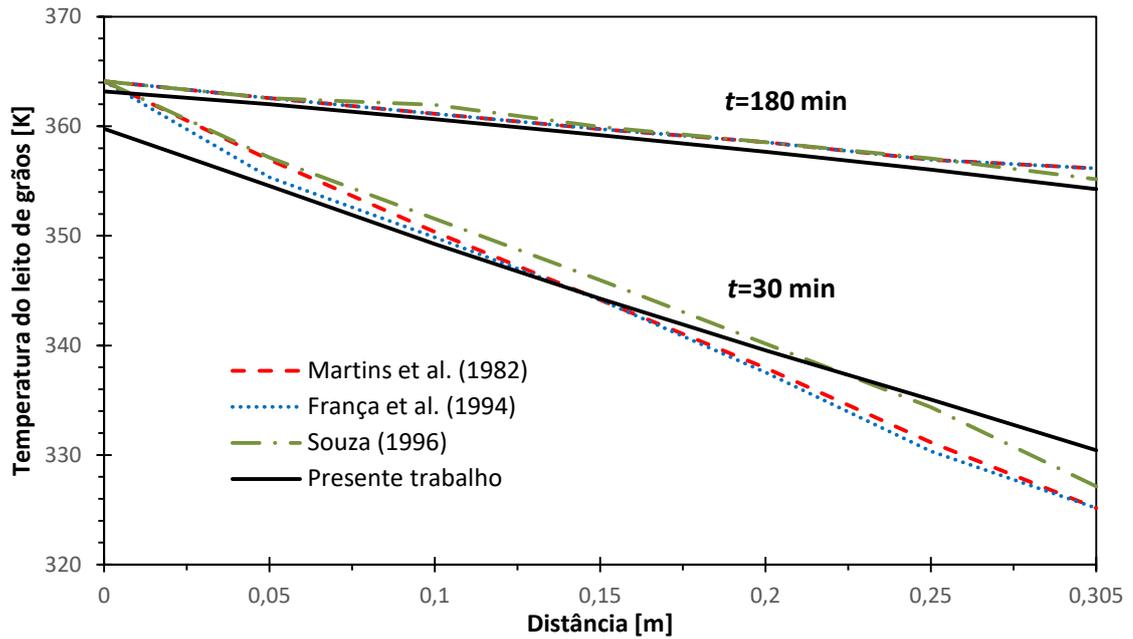
Sabe-se que uma simulação numérica é composta por um número finito de pontos e que sua solução não é contínua, e sim discreta. Porém, neste trabalho as soluções das simulações numéricas foram representadas por curvas contínuas, onde tais curvas representam linhas de tendência. Este procedimento é adotado na grande maioria dos trabalhos na área de secagem.

Figura 7. Teor de umidade do leito de grãos M em função do comprimento do secador.



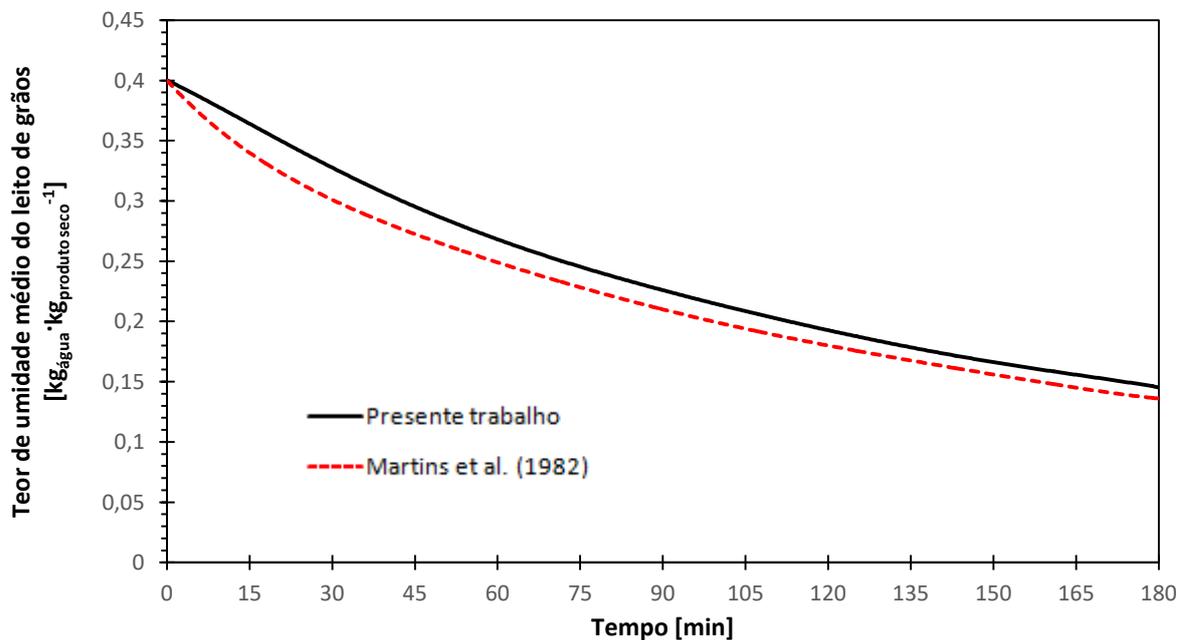
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8. Temperatura do leito de grãos θ em função do comprimento do secador.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 9. Teor de umidade médio do leito de grãos \bar{M} em função do tempo t .



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da verificação do modelo de escoamento do ar unidimensional para predição dos parâmetros temperatura e teor de umidade do leito de grãos em função do comprimento do secador, para dois tempos distintos de simulação, e teor de umidade médio do leito de grãos em função do tempo.

Tabela 4. Comparação do modelo proposto com as simulações numéricas.

	Comparação	<i>M</i> em função de <i>x</i>		<i>θ</i> em função de <i>x</i>		\bar{M} em função de <i>t</i>
		<i>t</i> =30min	<i>t</i> =180min	<i>t</i> =30min	<i>t</i> =180min	
DPR _% [%]	Martins et al. (1982)	1,29	3,99	0,94	0,28	6,42
	França et al. (1994)	4,01	2,36	0,96	0,28	-
	Souza (1996)	4,09	3,67	0,73	0,26	-

Fonte: elaborado pelo autor.

Em relação à comparação entre a simulação do presente trabalho e a simulação de outros autores do mesmo caso (MARTINS et al., 1982; FRANÇA et al., 1994; SOUZA, 1996), observa-se que as diferenças também foram pequenas, com todos os valores de DPR_% abaixo de 6,42%. A maior diferença foi obtida para a simulação numérica do teor de umidade médio do leito de grãos em função do tempo. No geral, à medida que o tempo de simulação avança, as diferenças tendem a diminuir.

Nota-se na Figura 8 que há uma pequena diferença na temperatura do leito de grãos entre a simulação do presente trabalho e as simulações dos outros autores para um tempo *t*=30min, principalmente na entrada e na saída do secador. Em outras palavras, pode-se observar que a curva que representa a temperatura do leito de grãos para o presente trabalho para *t*=30min está menos inclinada do que as curvas apresentadas pelos outros autores. Inicialmente pensou-se que isto ocorreu devido à diferença do cálculo do coeficiente convectivo *h*, apresentado neste trabalho pela Eq. (30). Nos trabalhos de Martins et al. (1982), França et al. (1994) e Souza (1996) é utilizado um valor para o *h* praticamente constante que vale $78,8\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, enquanto neste presente trabalho é utilizada uma equação contida em muitos trabalhos recentes para o cálculo do *h* que depende de uma série de parâmetros, tais como velocidade, calor específico, massa específica e viscosidade do ar de secagem.

Porém, verificou-se que a utilização da Eq. (30) praticamente não alterou o resultado final da simulação. Foi feita uma simulação numérica a fim de comparação utilizando o mesmo coeficiente convectivo utilizado por Martins et al. (1982), França et al. (1994) e Souza (1996), e esta foi comparada com o resultado da simulação numérica do presente trabalho. Obteve-se um DPR_% de 0,23% quando foram comparadas as curvas de teor de umidade do grão em função do comprimento do secador para um tempo *t*=30min e de 0,29% para um tempo de *t*=180min. Comparando as curvas de temperatura do leito de grãos em função do comprimento do secador, obteve-se um DPR_% de 0,72% para *t*=30min e 0,17% para

$t=180$ min. Também foram comparadas as curvas de teor médio de umidade do leito de grãos em função do tempo, onde foi obtido um valor de $DPR_{\%}$ de 0,05%.

Assim, a mudança no cálculo do coeficiente convectivo não foi o responsável por tal diferença da temperatura do leito de grãos. Não se chegou a um consenso a respeito da causa dessa diferença, porém o mais provável seja a utilização neste presente trabalho de equações de propriedade para o ar e para o milho diferentes das utilizadas por Martins et al. (1982), França et al. (1994) e Souza (1996).

Outro ponto a se abordar é a respeito do ajuste polinomial feito para se calcular os calores específicos tanto para o ar úmido ($c_a + c_v w$), quanto para o milho ($c_g + c_w M$), já discutidos brevemente na seção 4.3. O software *ANSYS Fluent 18.0* tem uma limitação no cálculo do calor específico através da macro `DEFINE_SPECIFIC_HEAT`, e não se permite calculá-los em função de w e de M . A saída para este problema foi chegar às curvas de w médio em função do tempo e de M médio em função do tempo para usá-las no cálculo do calor específico. Foi feito um ajuste polinomial dos valores médios de w e M ao longo de todo o leito de grãos para todo o tempo de secagem, chegando-se às Eqs. (83) e (84).

$$\bar{w}(t_h) = 1,457 \cdot 10^{-2} + 1,332 \cdot 10^{-2} \cdot t_h - 3,201 \cdot 10^{-2} \cdot t_h^2 + 2,462 \cdot 10^{-2} \cdot t_h^3 - 8,086 \cdot 10^{-3} \cdot t_h^4 + 9,642 \cdot 10^{-4} \cdot t_h^5, \text{ com } R^2 = 0,977 \quad (83)$$

$$\bar{M}(t_h) = 3,970 \cdot 10^{-1} - 1,466 \cdot 10^{-1} \cdot t_h + 2,137 \cdot 10^{-2} \cdot t_h^2, \text{ com } R^2 = 0,999 \quad (84)$$

Onde t_h é o tempo de simulação em hora e R^2 é o coeficiente de determinação.

Depois de validar o modelo com dados experimentais e de compará-lo com outras simulações numéricas contidas na literatura, estudou-se o comportamento da secagem apresentada pelo modelo matemático do presente trabalho. Os comportamentos de diversos parâmetros de secagem em função do comprimento do secador obtidos pela simulação numérica apresentada na Tabela 5 utilizando o modelo matemático do presente trabalho podem ser observados através das Figuras 10 a 12, para diferentes tempos de simulação. Nota-se que todas as curvas tendem a atingir um estado permanente, que para essa simulação é aproximadamente aos 180 minutos. Após este tempo de simulação, as curvas dos parâmetros sofrem mudanças pouco expressivas. Esse comportamento também é observado

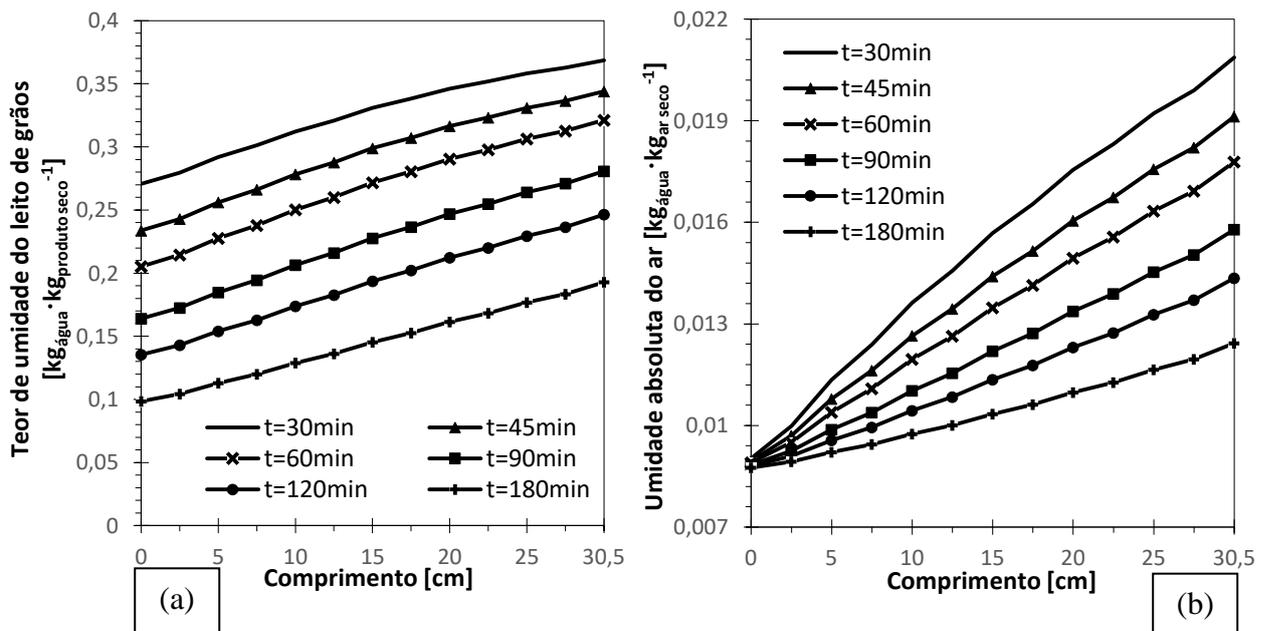
no trabalho de outros autores (SRIVASTAVA, JOHN, 2002; RANJBARAN et al., 2014). A Tabela 5 apresenta os parâmetros de simulação utilizados.

Tabela 5. Condições iniciais e de contorno do modelo de secagem unidimensional.

T_{in}	v_{in}	RH_{in}	w_{in}	T_0	θ_0	M_0
[K]	[m·s ⁻¹]	[-]	[kg _{água} ·kg _{ar seco} ⁻¹]	[K]	[K]	[kg _{água} ·kg _{produto seco} ⁻¹]
364,1	0,648	0,55	0,0087	294,4	291,9	0,400

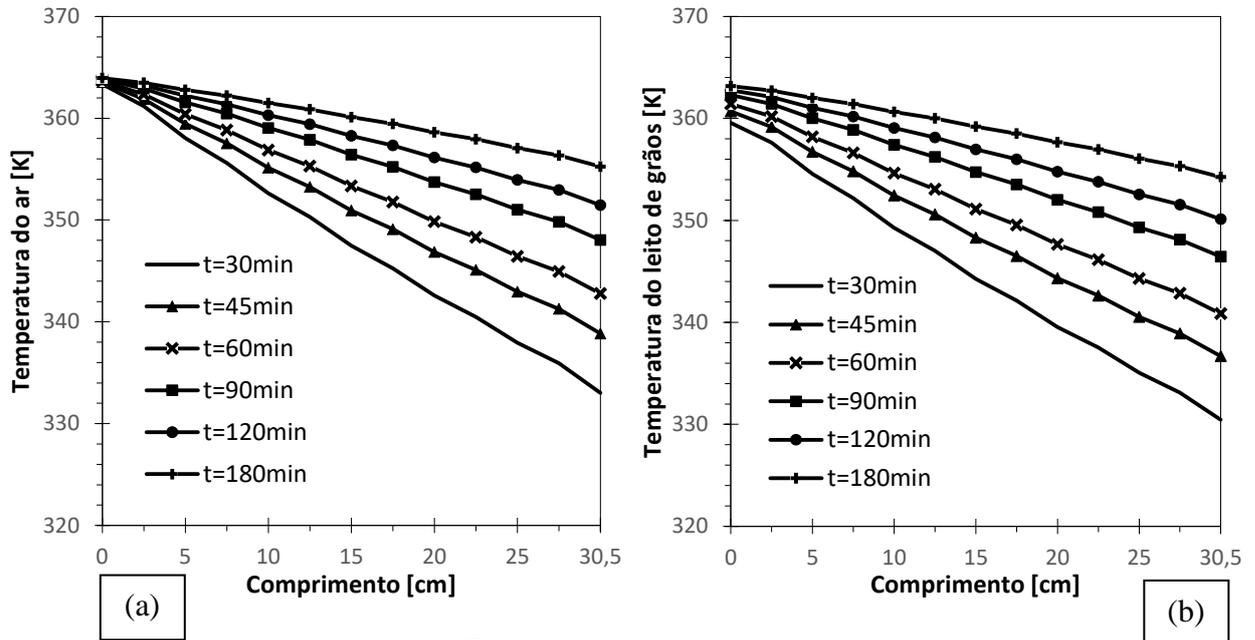
Fonte: Martins et al., 1982.

Figura 10. Teor de umidade do leito de grãos (a) e umidade absoluta do ar (b) em função do comprimento do secador.



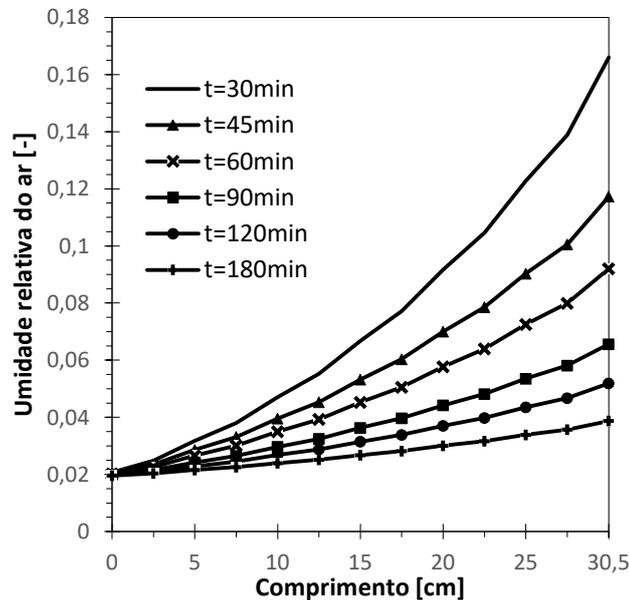
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 11. Temperatura do ar (a) e temperatura do leito de grãos (b) em função do comprimento do secador.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 12. Umidade relativa do ar em função do comprimento do secador.



Fonte: elaborado pelo autor.

O tempo de simulação para se atingir um teor de umidade médio do leito de grãos de 13% foi de 12405s. Algumas considerações podem ser feitas a partir das Figuras 10 a 12. No início da simulação, o leito de grãos possui um teor de umidade elevado, o que implica em um grande aumento da umidade absoluta e relativa do ar intergranular à medida que este

atravessa o leito de grãos. Com o passar do tempo o teor de umidade do leito de grãos é reduzido, ocasionando em uma redução da absorção da umidade pelo ar de secagem. Verifica-se também que as camadas de grãos mais próximas à entrada de ar do secador se aquecem mais e atingem teores de umidade mais baixos, enquanto as camadas de grãos mais próximas à saída de ar do secador apresentam temperatura mais reduzida e teores de umidade mais elevados, devido à diminuição da energia e da capacidade de secagem do ar à medida que este atravessa o leito de grãos.

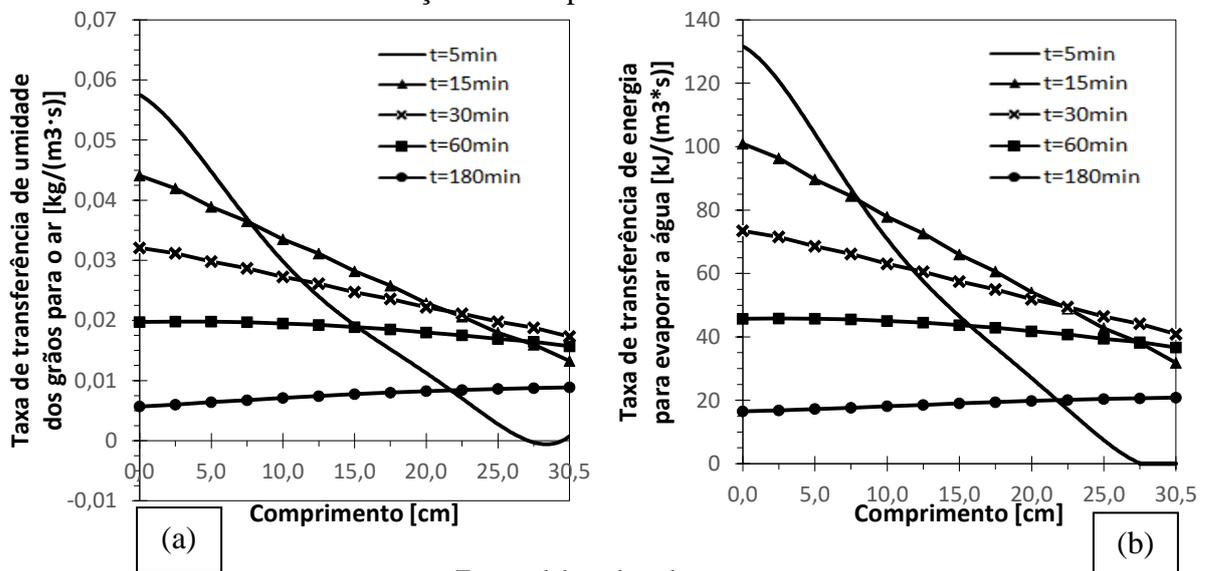
Nota-se pela Figura 12 que a umidade relativa do ar na entrada é de aproximadamente 0,02. Porém, foi apresentado na Tabela 5 que a umidade relativa do ar na entrada é de 0,55. Sabe-se que a umidade relativa do ar representa a relação entre a pressão parcial de vapor de água contida no ar e a pressão de vapor de saturação, sendo que esta última, também chamada de pressão de vapor nas condições de equilíbrio, depende da temperatura de equilíbrio. Assim, a diferença entre os valores de umidade relativa do ar ocorreu porque o valor de 0,55 considera a temperatura ambiente do ar T_0 como sendo a temperatura de equilíbrio, já o valor de 0,02 considera a temperatura do ar de secagem na entrada T_{in} como sendo a temperatura de equilíbrio. Em suma, estes dois valores de RH representam o mesmo valor de umidade absoluta do ar de $0,0087 \text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$.

Outras observações podem ser feitas a partir da Figura 13, que representam, respectivamente, a componente $(1 - \varepsilon)\rho_g \frac{\partial M}{\partial t} h_{fg}$ do termo fonte da equação de conservação de energia para o leito de grãos (Eq. (44)) e o termo fonte da equação de balanço de umidade para o ar (Eq. (18)) em função do comprimento do secador. No início da simulação, uma maior quantidade de energia é despendida na evaporação dos grãos localizados próximos à entrada de ar do secador, e conseqüentemente uma maior quantidade de água é evaporada nessa região, passando dos grãos para o ar. À medida que o tempo passa, o teor de umidade dos grãos nas regiões próximas à entrada do secador diminui, aumentando a entalpia disponível nas regiões mais distantes da entrada do secador, aumentando a taxa de transferência de energia para evaporar a água contida nos grãos e a taxa de secagem nessas regiões.

Outra consideração a ser feita é que nos primeiros períodos de secagem ($t < 5 \text{min}$) a taxa de transferência de umidade dos grãos para o ar possui valores levemente negativos nas camadas mais distantes da entrada do secador, o que significa que os grãos estão absorvendo umidade do ar úmido, ao invés de perdê-la. Este fenômeno também é demonstrado por Ranjbaran et al. (2014) e, segundo o autor, é mais severo quando aplicado vazões mássicas de

ar mais baixas e leitos de grãos mais profundos. Nota-se também que nos primeiros períodos de secagem a taxa de transferência de energia para evaporar a água contida nos grãos possui valores nulos nas regiões próximas à saída do secador. Isto foi feito propositalmente para que este parâmetro não ficasse negativo, já que matematicamente o correto seria esse parâmetro ficar levemente negativo nas últimas camadas de milho do secador como consequência da observação feita anteriormente. O valor da taxa de transferência de energia para evaporar a água nos grãos ficar negativo significa que o leito de grãos está ganhando energia para evaporar a água contida neste, o que não faz sentido fisicamente (RANJBARAN et al., 2014).

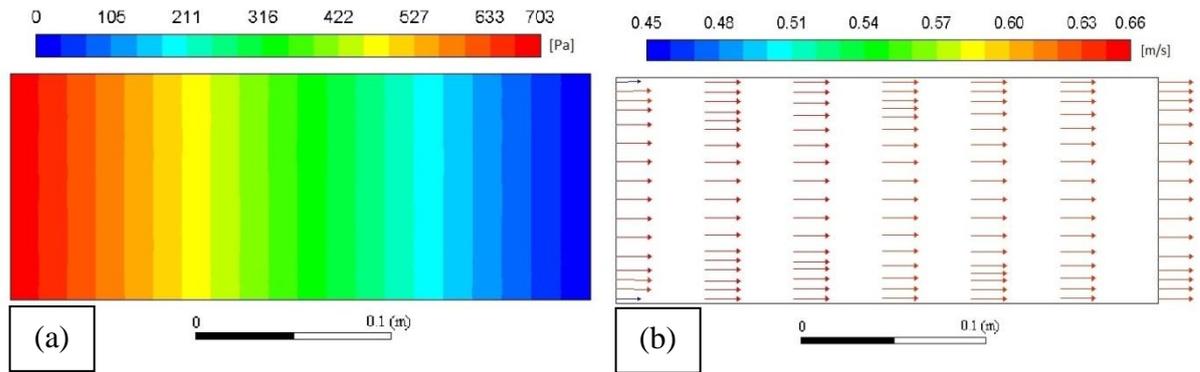
Figura 13. Taxa de transferência de umidade (a) e taxa de transferência de energia (b) em função do comprimento do secador.



Fonte: elaborado pelo autor.

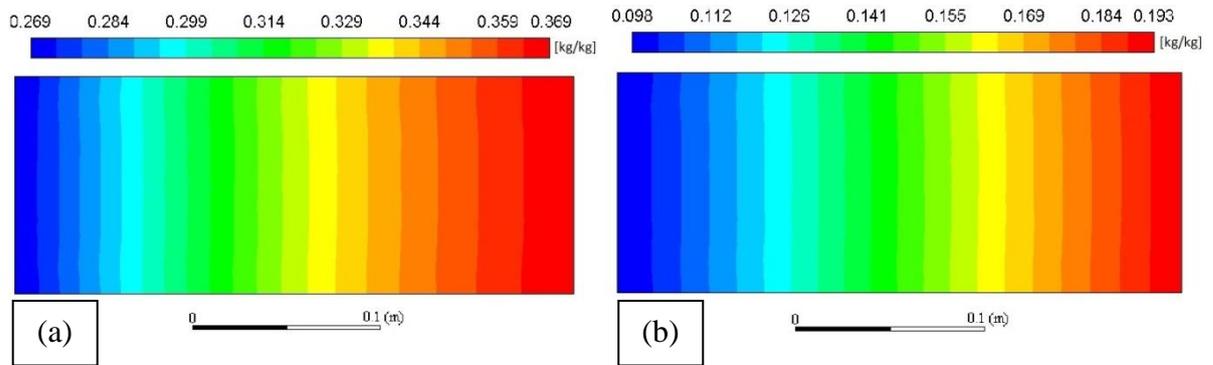
Outra forma de visualização dos resultados do presente trabalho é através das isolinhas, disponibilizada pelo software *ANSYS Fluent 18.0*. Thorpe (2008) diz que estas formas de visualização apresentadas pelos softwares de CFD são muito úteis e podem apresentar uma quantidade muito grande de informações para o usuário. Na Figura 14 são apresentados o gradiente de pressão e as linhas de corrente ao longo do secador. Esses dois parâmetros variam muito pouco ao longo do tempo, portanto decidiu-se apresentá-los para apenas um tempo de simulação arbitrário ($t=180\text{min}$). Nas Figuras 15 a 19 é possível observar o comportamento de diferentes parâmetros de secagem através das isolinhas para dois diferentes tempos de secagem ($t=30\text{min}$ e $t=180\text{min}$).

Figura 14. Gradiente de pressão (a) e linhas de corrente (b) ao longo do secador.



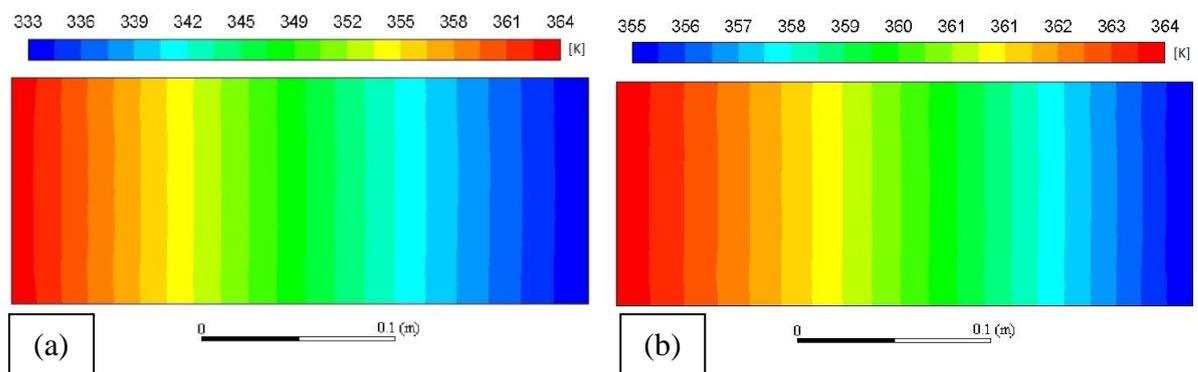
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 15. Teor de umidade do leito de grãos para: (a) $t=30\text{min}$ e (b) $t=180\text{min}$.



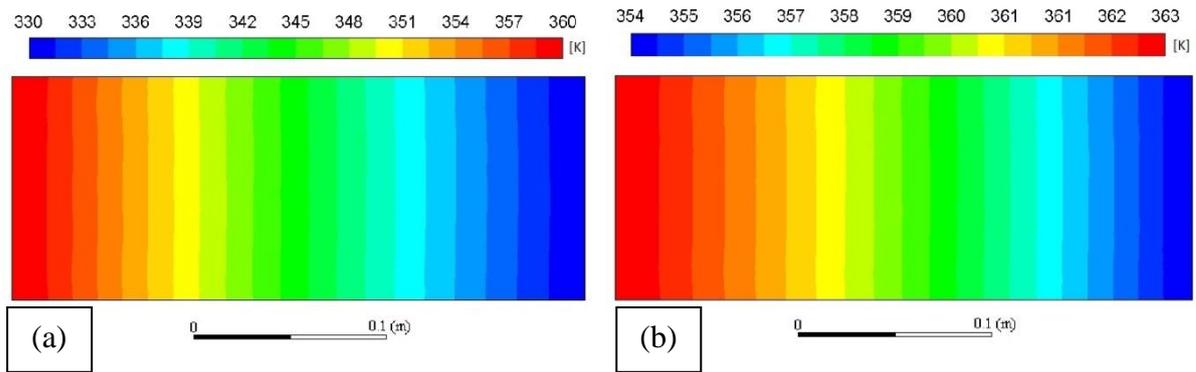
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 16. Temperatura do ar para: (a) $t=30\text{min}$ e (b) $t=180\text{min}$.



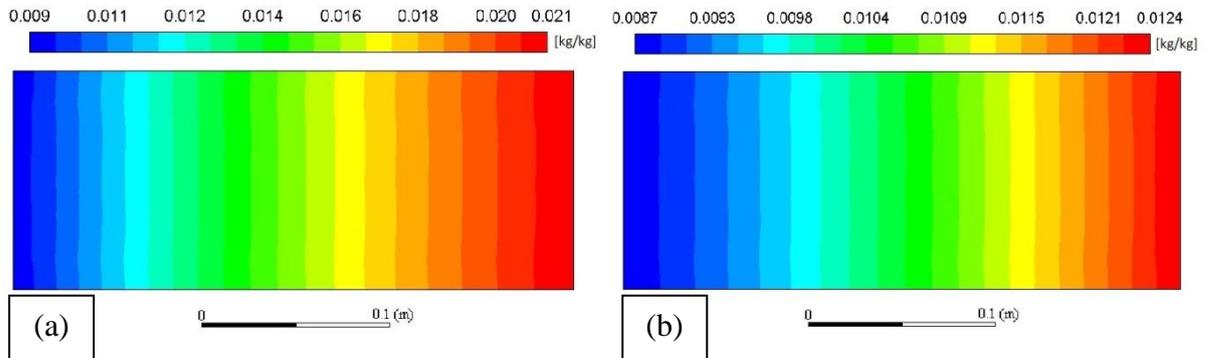
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 17. Temperatura do leito de grãos para: (a) $t=30\text{min}$ e (b) $t=180\text{min}$.



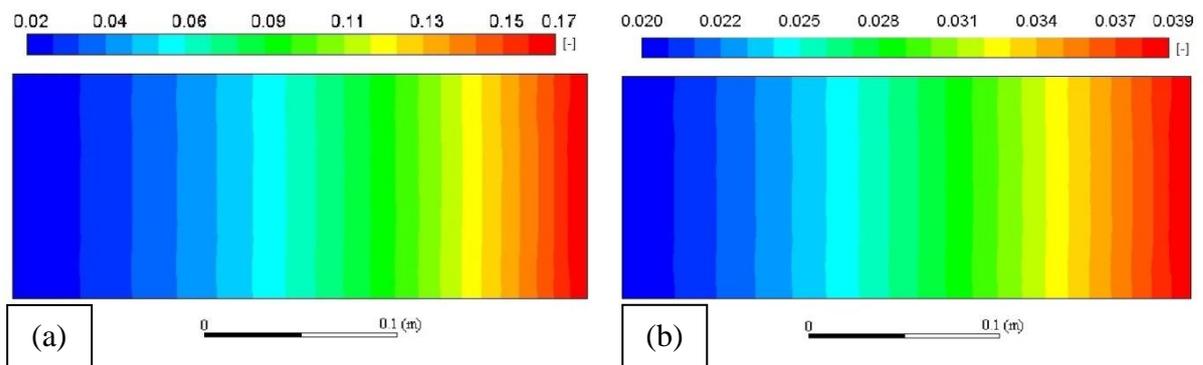
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 18. Umidade absoluta do ar para: (a) $t=30\text{min}$ e (b) $t=180\text{min}$.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 19. Umidade relativa do ar para: (a) $t=30\text{min}$ e (b) $t=180\text{min}$.



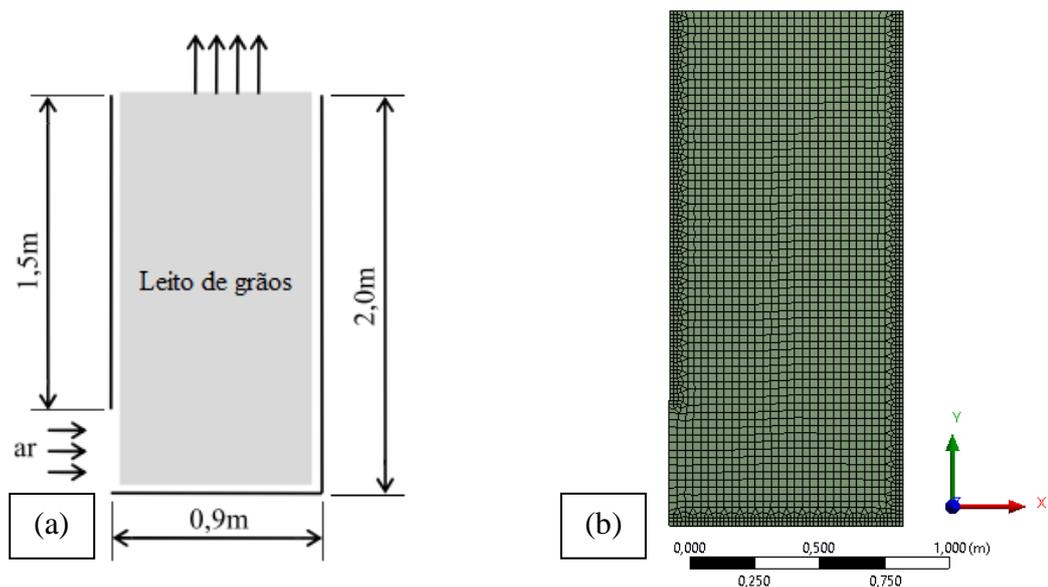
Fonte: elaborado pelo autor.

Dessa forma, pode-se dizer que o modelo matemático deste presente trabalho foi capaz de prever o comportamento da secagem de um leito de grãos para um escoamento de ar unidimensional e está de acordo com o comportamento apresentado por diversos autores (MARTINS et al., 1982; BROOKER et al., 1992; FRANÇA et al., 1994; SRIVASTAVA, JOHN, 2002; AREGBA, NADEAU, 2007; NAGHAVI et al., 2010).

6.2. 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 20.

Figura 20. Geometria do secador com escoamento de ar bidimensional (a) e malha computacional discretizada (b).



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

A malha computacional foi gerada através do gerador de malhas GAMBIT do ANSYS *Fluent 18.0* (ANSYS, 2017d) e está apresentada na Figura 20. Utilizou-se uma malha híbrida com predominância de elementos quadriláteros, com refinamento de malha nas bordas do secador. Foi empregado um total de 2894 elementos e 9045 nós, com o tamanho máximo de face de 0,030m e tamanho mínimo de face de 0,010m. As simulações foram feitas com um

passo no tempo Δt de 1s. Um estudo de tamanho de malha e avanço no tempo também foi feito para esta simulação utilizando diferentes tamanhos máximos de face para os VC (0,030m e 2894 elementos; 0,020m e 5830 elementos; e 0,010m e 20675 elementos) e diferentes avanços no tempo (1,0s, 0,5s e 0,1s), obtendo resultados muito próximos, com diferenças inexpressivas.

Quanto à qualidade da malha da geometria com escoamento de ar bidimensional, esta apresentou uma qualidade ortogonal inversa mínima (*Minimum Inverse Orthogonal Quality*) igual a 0,189 e, segundo ANSYS (2017d), pode ser classificada como excelente. Os parâmetros de qualidade *aspect ratio* e *cell growth factor* foram iguais a 2,795 e 1,000, respectivamente. Os três parâmetros de qualidade mencionados anteriormente atenderam os critérios estabelecidos por Ranjbaran e Zare (2012).

Para a simulação numérica bidimensional foram utilizados dados de referência presentes em França et al. (1994). A Tabela 6 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 $9,81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Na Tabela 6, $P_{in,man}$ representa a pressão manométrica de ar na entrada.

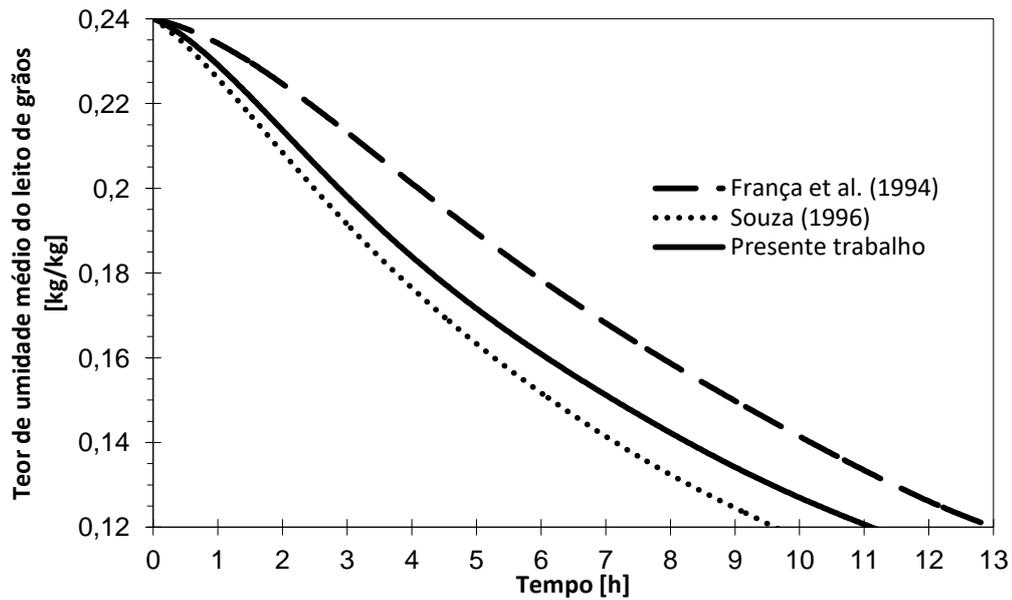
Tabela 6. Condições iniciais e de contorno do modelo de secagem bidimensional.

T_{in}	$P_{in,man}$	RH_{in}	w_{in}	T_0	θ_0	M_0
[K]	[Pa]	[-]	[kg _{água} ·kg _{ar seco} ⁻¹]	[K]	[K]	[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 21 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. Na Figura 21 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 6.

Figura 21. Teor de umidade médio do leito de grãos \bar{M} em função do tempo t .



Fonte: elaborado pelo autor.

Nota-se pela Tabela 7 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.

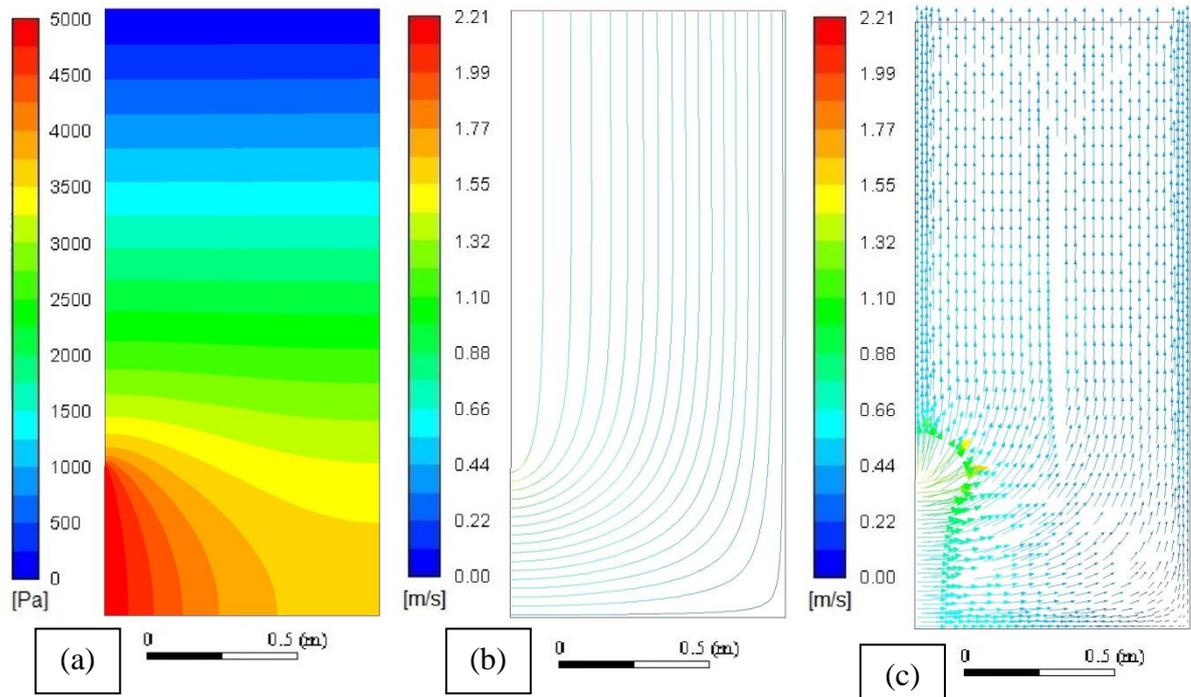
Tabela 7. Comparação do modelo proposto com as simulações numéricas.

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

Fonte: elaborado pelo autor.

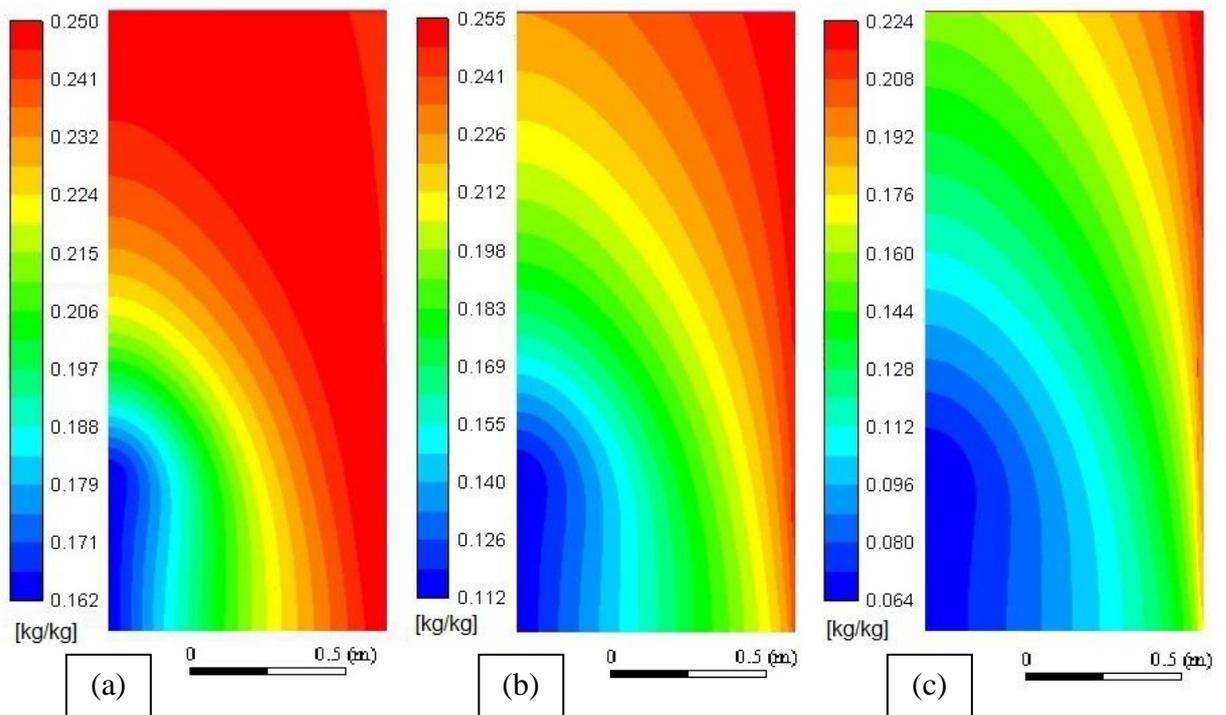
A Figura 22 mostra o gradiente de pressão, as linhas de corrente e o campo de velocidades ao longo do secador com escoamento de ar bidimensional. Como estes parâmetros praticamente não variam ao longo do tempo, aqui estes serão exibidos para um tempo arbitrário ($t=1h$). As Figuras 23 a 27 apresentam o comportamento de vários parâmetros de secagem para três tempos distintos de simulação ($t=1h$, $t=3h$ e $t=9h$).

Figura 22. Gradiente de pressão (a), linhas de corrente (b) e campo de velocidades (c) ao longo do secador.



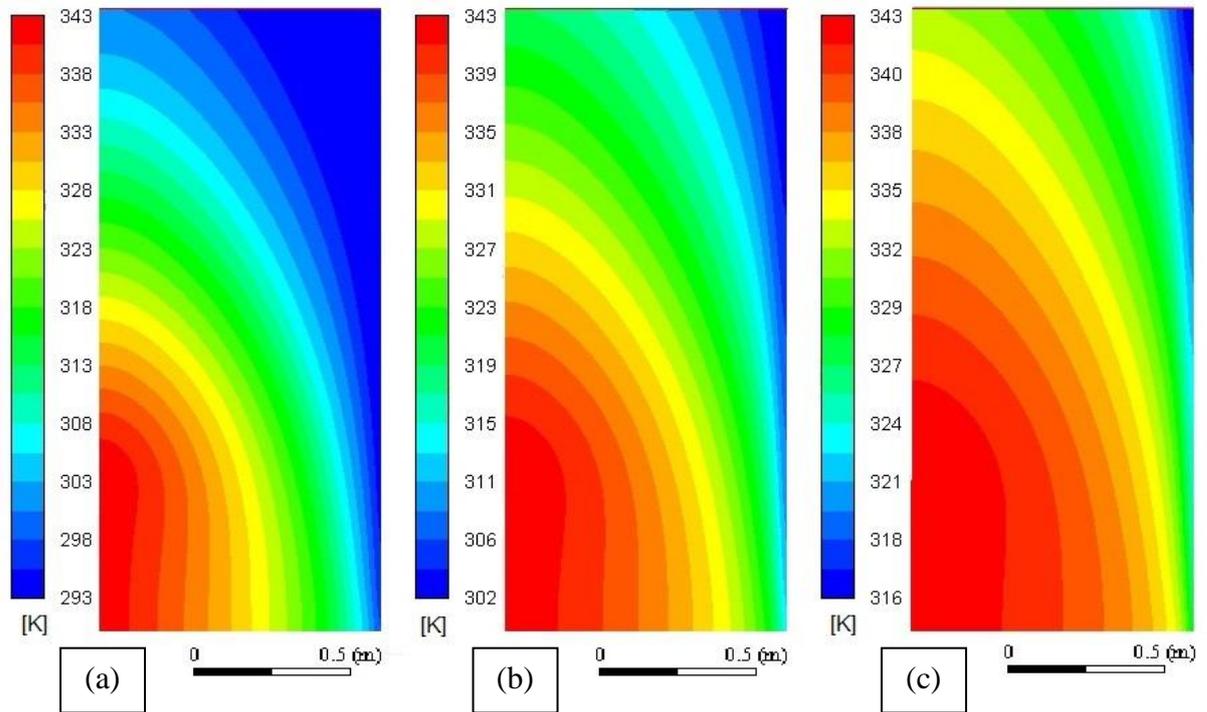
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 23. Teor de umidade do leito de grãos para: (a) $t=1h$, (b) $t=3h$ e (c) $t=9h$.



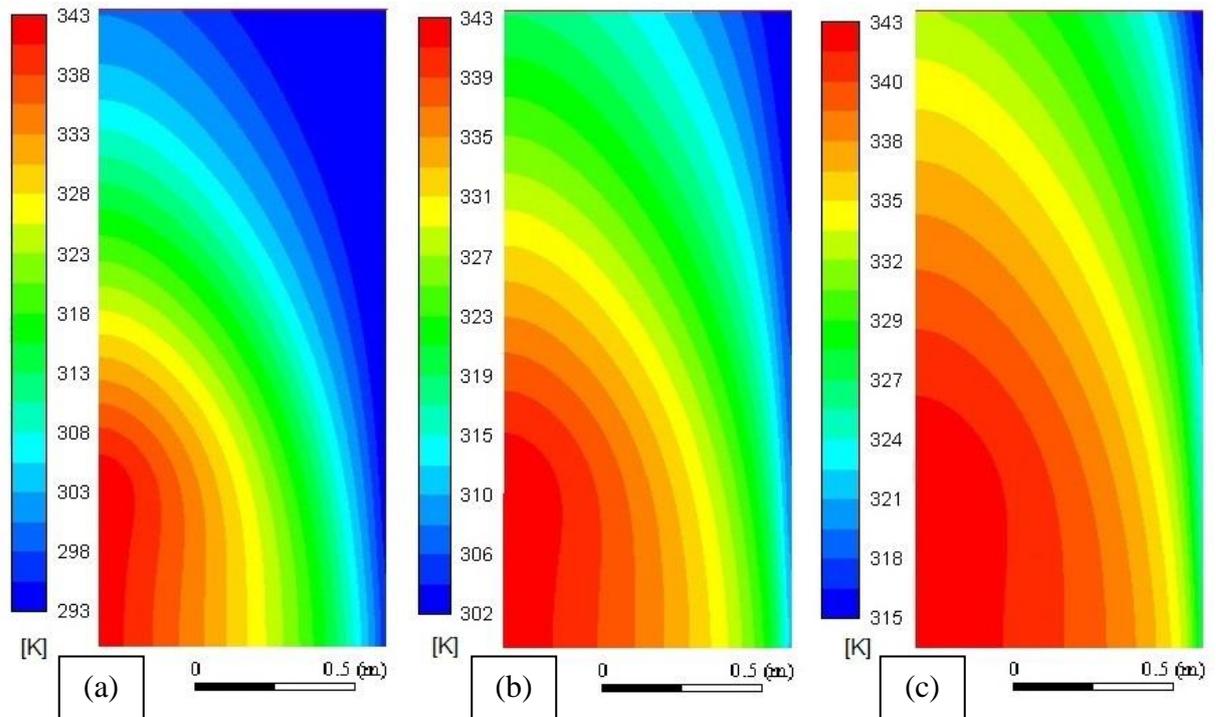
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 24. Temperatura do ar para: (a) $t=1h$, (b) $t=3h$ e (c) $t=9h$.



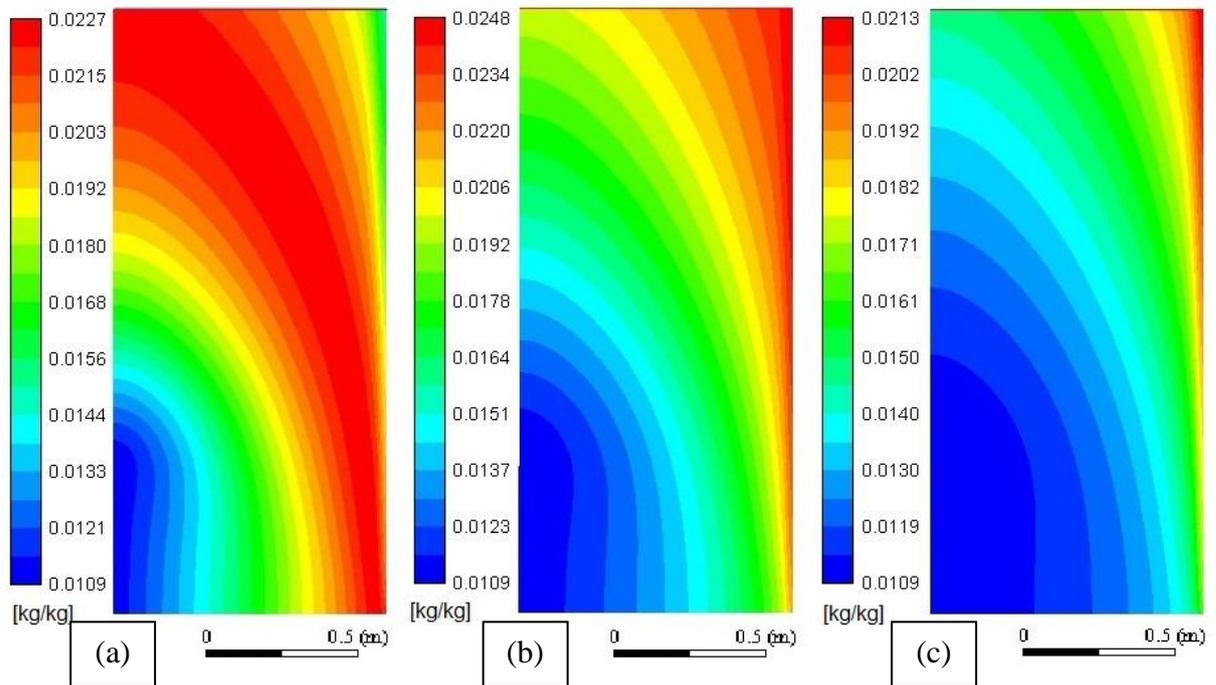
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 25. Temperatura do leito de grãos para: (a) $t=1h$, (b) $t=3h$ e (c) $t=9h$.



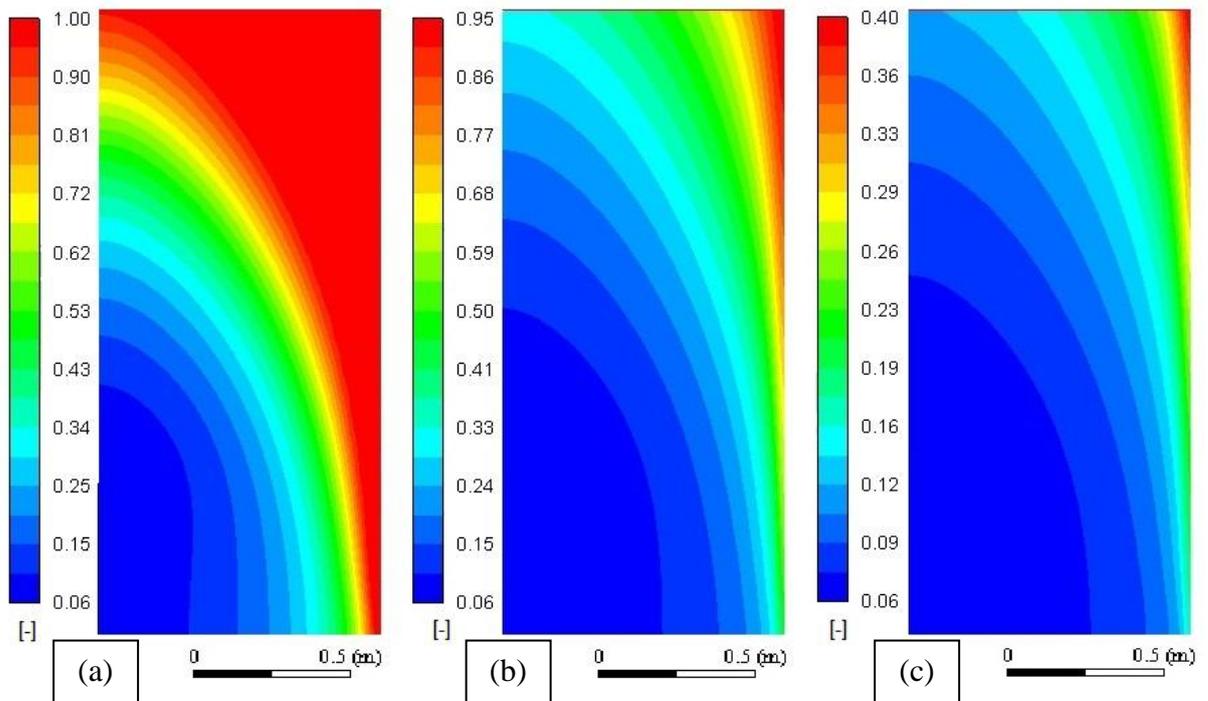
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 26. Umidade absoluta do ar para: (a) $t=1h$, (b) $t=3h$ e (c) $t=9h$.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 27. Umidade relativa do ar para: (a) $t=1h$, (b) $t=3h$ e (c) $t=9h$.



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%. A partir de uma observação das Figuras 22 a 27, é 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 se 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. Observa-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, o que é observado na Figura 23, 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 matemático 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 (Eq. (22)) infinito, uma vez que este também não possui capacidade infinita de absorção de umidade. Este fenômeno também foi demonstrado por França et al. (1994).

A respeito da geometria do secador com escoamento de ar bidimensional apresentado por França et al. (1994), nota-se a partir de uma observação da Figura 22 que há menos linhas de corrente na parede esquerda e no canto direito inferior, indicando baixa ventilação nestas regiões. Nota-se também pela Figura 22 que as velocidades do ar nessas regiões são mais baixas. Nessas regiões com baixa ventilação há risco de infestação por fungos ou mofo, levando à degradação da qualidade do produto (RANJBARAN et al., 2014). Dessa forma, pode-se afirmar que esta geometria não é muito adequada ao armazenamento e secagem dos

grãos. Uma solução para evitar este problema seria homogeneizar a massa de produto por mistura mecânica no interior do silo secador.

Outra observação a ser feita é que os perfis de temperatura do ar e do leito de grãos para os mesmos tempos de secagem tanto para o modelo de escoamento de ar unidimensional quanto para o bidimensional ficaram muito próximos, porém não idênticos. A utilização do modelo térmico de equilíbrio por alguns autores (THORPE, 2008; ROCHA et al., 2013; RYU et al., 2013; RANJBARAN et al., 2014), onde assume-se que as temperatura do ar e do leito de grãos são iguais, pode ser então considerada válida, apesar de acarretar erros, principalmente nos períodos iniciais da simulação.

Da mesma forma como foi realizado na simulação numérica para o secador com escoamento de ar unidimensional, também foi feito na simulação bidimensional um ajuste polinomial para se calcular os calores específicos tanto para o ar úmido ($c_a + c_v w$), quanto para o milho ($c_g + c_w M$). As Eqs. (85) e (86) representam as curvas de w médio em função do tempo e de M médio em função do tempo.

$$\bar{w}(t_h) = 1,287 \cdot 10^{-2} + 1,068 \cdot 10^{-2} \cdot t_h - 6,497 \cdot 10^{-3} \cdot t_h^2 + 1,696 \cdot 10^{-3} \cdot t_h^3 - 2,240 \cdot 10^{-4} \cdot t_h^4 + 1,459 \cdot 10^{-5} \cdot t_h^5 - 3,726 \cdot 10^{-7} \cdot t_h^6, \text{ com } R^2 = 0,991 \quad (85)$$

$$\bar{M}(t_h) = 2,436 \cdot 10^{-1} - 1,672 \cdot 10^{-2} \cdot t_h + 5,041 \cdot 10^{-4} \cdot t_h^2, \text{ com } R^2 = 0,999 \quad (86)$$

Assim, o modelo matemático proposto no presente trabalho também foi capaz de prever o comportamento 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).

6.3. Análise energética e exergética de secagem

Além de prever o comportamento da secagem dos grãos de milho em leito fixo para modelos de escoamento de ar unidimensional e bidimensional, foi feita também uma análise energética e exergética dos secadores, onde foram calculadas as eficiências energética e exergética de secagem ao longo do tempo de simulação para os modelos estudados. Alguns

parâmetros de secagem foram modificados a fim de se estudar o comportamento da eficiência energética e exergética para diferentes condições de secagem. Para esta análise, as simulações ocorreram até se atingir um teor de umidade médio do leito de grãos de 13% em bulbo seco, valor considerado ideal para o armazenamento dos grãos de milho (BROOKER et al., 1974; EMBRAPA, 2017).

É importante ressaltar que para esta análise não foi levado em consideração qualidade e quebra dos grãos. Sabe-se que processos de secagem que envolvem temperaturas do ar de secagem muito elevadas e rápidas reduções dos teores de umidade dos grãos podem comprometer a qualidade destes e gerar perda de produto (BROOKER et al., 1992). Sabe-se também que a temperatura máxima permitida de secagem depende da utilização dos grãos de milho. Segundo Brooker et al. (1992) as temperaturas não podem ser superiores a 316,48K, para utilização dos grãos de milho como semente (com poder germinativo), 333,15K para alimentação humana e 366,48K para alimentação animal. Para a análise energética e exergética esta última condição foi obedecida.

Tabela 8. Variação das condições de secagem.

Condição de secagem	Modelo unidimensional (Teste 1)				Modelo bidimensional			
	v_{in} [m·s ⁻¹]	T_{in} [K]	RH_{in} [-]	w_{in} [kg _{água} ·kg _{ar seco} ⁻¹]	$P_{in,man}$ [Pa]	T_{in} [K]	RH_{in} [-]	w_{in} [kg _{água} ·kg _{ar seco} ⁻¹]
Velocidade/ pressão do ar na entrada	0,30				2000			
	0,45				3500			
	0,65	364,1	0,55	0,0087	5000	343,15	0,55	0,0109
	1,00				6500			
	2,00				8000			
Temperatura do ar na entrada		344,1				323,15		
		349,1				333,15		
	0,65	354,1	0,55	0,0087	5000	343,15	0,55	0,0109
		359,1				353,15		
		364,1				363,15		
Umidade relativa do ar na entrada			0,25	0,0039			0,25	0,0049
			0,40	0,0063			0,40	0,0079
	0,65	364,1	0,55	0,0087	5000	343,15	0,55	0,0109
			0,70	0,0111			0,70	0,0139
		0,85	0,0135			0,85	0,0170	

Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 8 apresenta as diferentes condições de secagem estudadas. Os parâmetros não identificados na Tabela 8 foram empregados conforme parâmetros de referência apresentados na Tabela 5, para o modelo unidimensional, e na Tabela 6, para o modelo bidimensional. Enquanto alguns parâmetros foram variados para se estudar a influência destes sobre as eficiências energética e exergetica, outros parâmetros se mantiveram fixos, conforme Tabela 8. Os parâmetros de referência estabelecidos para o estado morto são: $T_{00} = 298,15\text{K}$, $P_{00} = 101325\text{Pa}$, $w_{00} = 0,0119\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ e $RH_{00} = 0,60$ (AMANTÉA et al., 2013).

Nas Tabelas 9 e 10 são apresentados os valores médios e de pico para as eficiências energética e exergetica obtidas através das simulações numéricas para as diversas condições de secagem, conforme Tabela 8, para os modelos de escoamento de ar unidimensional e bidimensional.

Tabela 9. Valores de eficiência energética e exergetica (média e pico) para o modelo de escoamento de ar unidimensional.

Parâmetro estudado	Valor do parâmetro	Tempo de simulação [s]	Eficiência energética		Eficiência exergetica	
			Média [%]	Pico [%]	Média [%]	Pico [%]
Velocidade do ar na entrada [m/s] – ($T_{in}=364,1\text{K}$; $RH_{in}=0,55$)	0,30	18094	37,44	62,45	28,87	41,40
	0,45	14575	30,75	55,10	22,99	35,98
	0,65	12405	24,94	47,81	17,15	29,34
	1,00	10598	18,83	39,06	10,98	20,85
	2,00	8970	11,07	25,58	4,41	9,67
Temperatura do ar na entrada [K] – ($v_{in}=0,65\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $RH_{in}=0,55$)	344,1	25450	16,71	48,38	7,92	19,28
	349,1	20725	18,72	47,94	9,98	21,88
	354,1	17162	20,81	47,76	12,26	24,45
	359,1	14463	22,92	47,80	14,67	26,95
	364,1	12405	24,94	47,81	17,15	29,34
Umidade relativa do ar na entrada [-] – ($T_{in}=364,1\text{K}$; $v_{in}=0,65\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0,25	11986	25,86	48,62	12,77	21,40
	0,40	12200	25,38	48,27	15,33	25,98
	0,55	12405	24,94	47,81	17,15	29,34
	0,70	12545	24,60	47,55	17,91	30,85
	0,85	12727	24,26	47,25	17,49	30,32

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 10. Valores de eficiência energética e exergética (média e pico) para o modelo de escoamento de ar bidimensional.

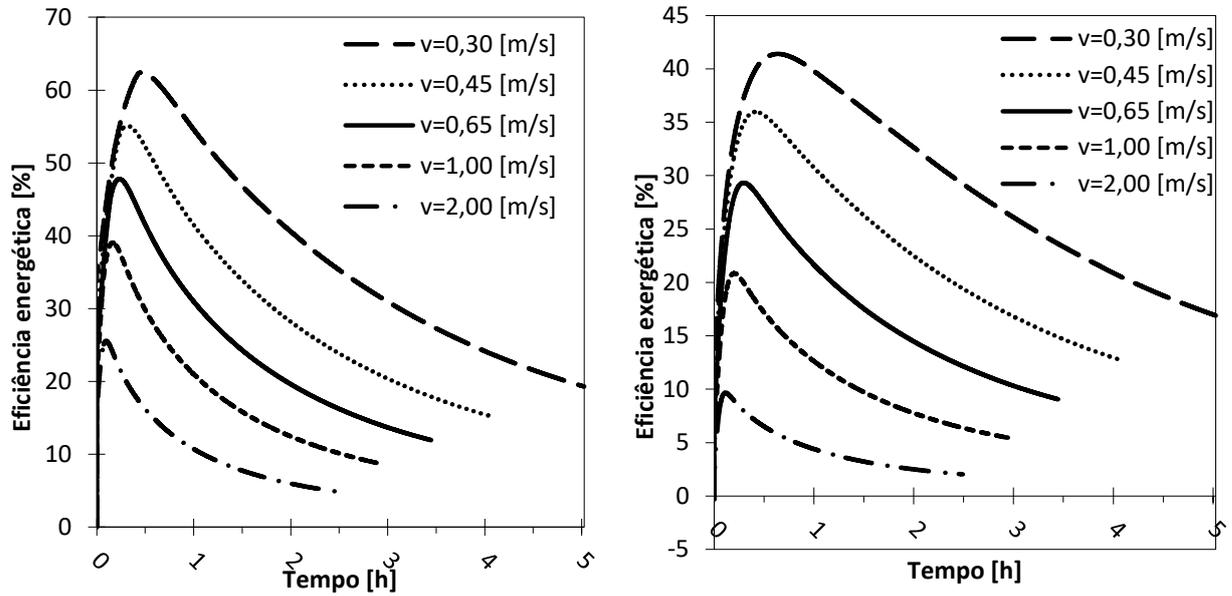
Parâmetro estudado	Valor do parâmetro	Tempo de simulação [s]	Eficiência energética		Eficiência exergética	
			Média [%]	Pico [%]	Média [%]	Pico [%]
Pressão do ar (manométrica) na entrada [Pa] – ($T_{in}=343,15K$; $RH_{in}=0,55$)	2000	51572	53,14	67,52	26,12	30,12
	3500	40235	48,80	64,48	21,03	24,91
	5000	34512	46,20	63,09	18,19	22,15
	6500	31220	43,99	61,47	16,15	20,07
Temperatura do ar na entrada [K] – ($P_{in}=5000Pa$; $RH_{in}=0,55$)	8000	28932	42,25	60,16	14,65	18,52
	323,15	71119	37,65	68,68	6,38	9,45
	333,15	46970	42,23	64,67	11,96	15,77
	343,15	34512	46,20	63,09	18,19	22,15
Umidade relativa do ar na entrada [-] – ($T_{in}=343,15K$; $P_{in}=5000Pa$)	353,15	27150	49,58	62,60	24,46	28,20
	0,25	30683	50,25	66,26	18,16	21,47
	0,40	32609	48,05	64,63	18,41	22,09
	0,55	34512	46,20	63,09	18,19	22,15
	0,70	36671	44,19	61,09	17,49	21,58
	0,85	38443	42,66	59,52	16,71	20,86

Fonte: elaborado pelo autor.

As Figuras 28 a 33 apresentam as curvas de eficiências energéticas e exergéticas em função do tempo para diferentes condições de secagem, conforme Tabela 8, dos modelos de escoamento de ar unidimensional (1D) e bidimensional (2D) previamente estudados.

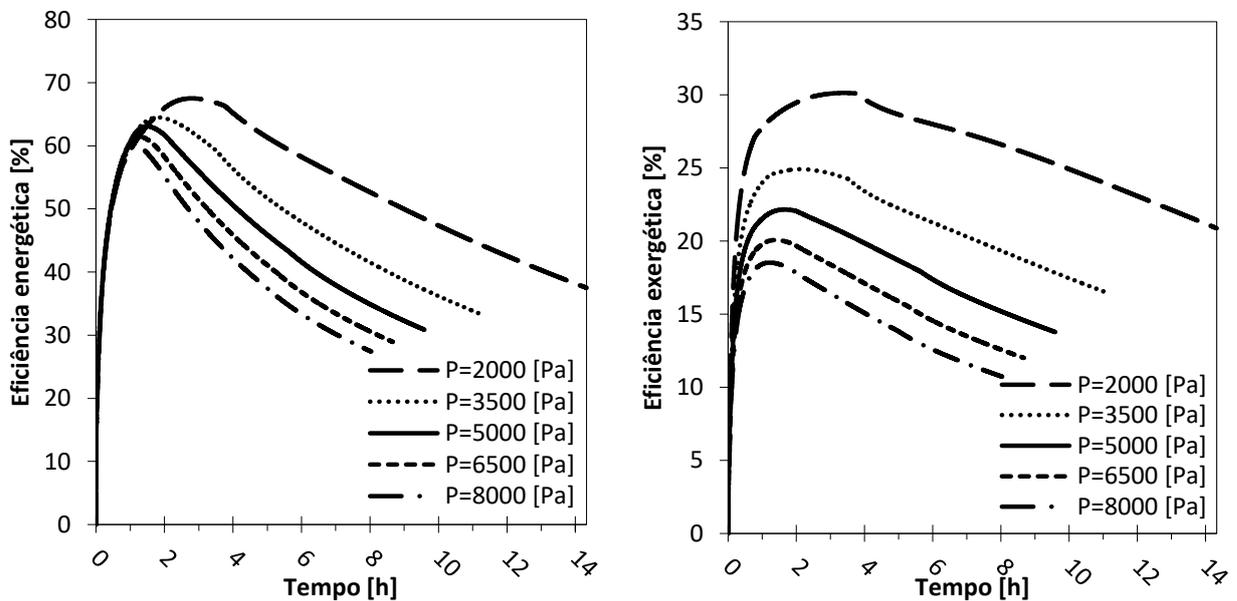
Um comportamento comum pode ser observado nas Figuras 28 a 33. No início do período de secagem há um rápido crescimento das eficiências energéticas e exergéticas devido às elevadas taxas de secagem neste estágio. Grande parte da entalpia contida no ar que entra no secador é consumida na evaporação da água contida nos grãos, acarretando em picos de eficiência nos primeiros períodos da simulação, uma vez que o valor das eficiências é proporcional à quantidade de umidade evaporada. Após atingirem o ápice, as curvas de eficiência passam a ter uma tendência decrescente devido à queda da taxa de secagem, levando à diminuição do processo de evaporação da umidade contida nos grãos, e à exaustão para fora do secador de ar aquecido não aproveitado, porém ainda com grande potencial energético. Este comportamento também é demonstrado nos trabalhos de Amantéa et al. (2013) e Ranjbaran et al. (2014).

Figura 28. Efeito da velocidade do ar na entrada do secador nas eficiências energética e exérgica (modelo 1D). Parâmetros fixos: $T_{in}=364,1K$ e $RH_{in}=0,55$.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 29. Efeito da pressão do ar na entrada do secador nas eficiências energética e exérgica (modelo 2D). Parâmetros fixos: $T_{in}=343,15K$ e $RH_{in}=0,55$.

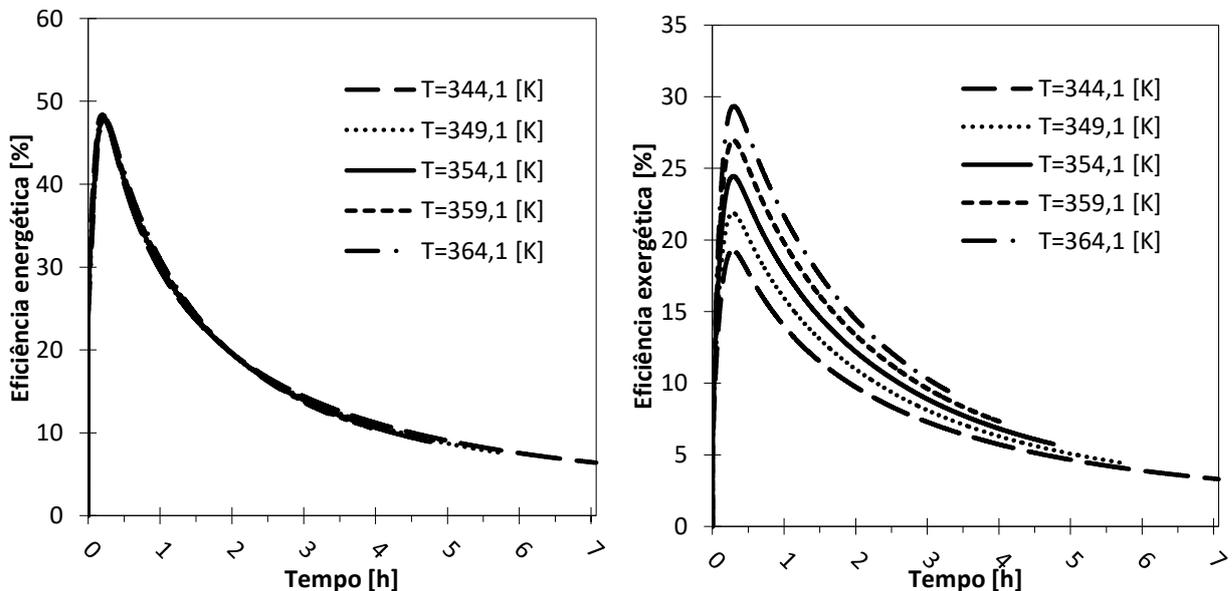


Fonte: elaborado pelo autor.

Os efeitos da velocidade e da pressão do ar na entrada do secador sobre as eficiências energética e exérgica são demonstrados nas Figuras 28 e 29. Os parâmetros temperatura do

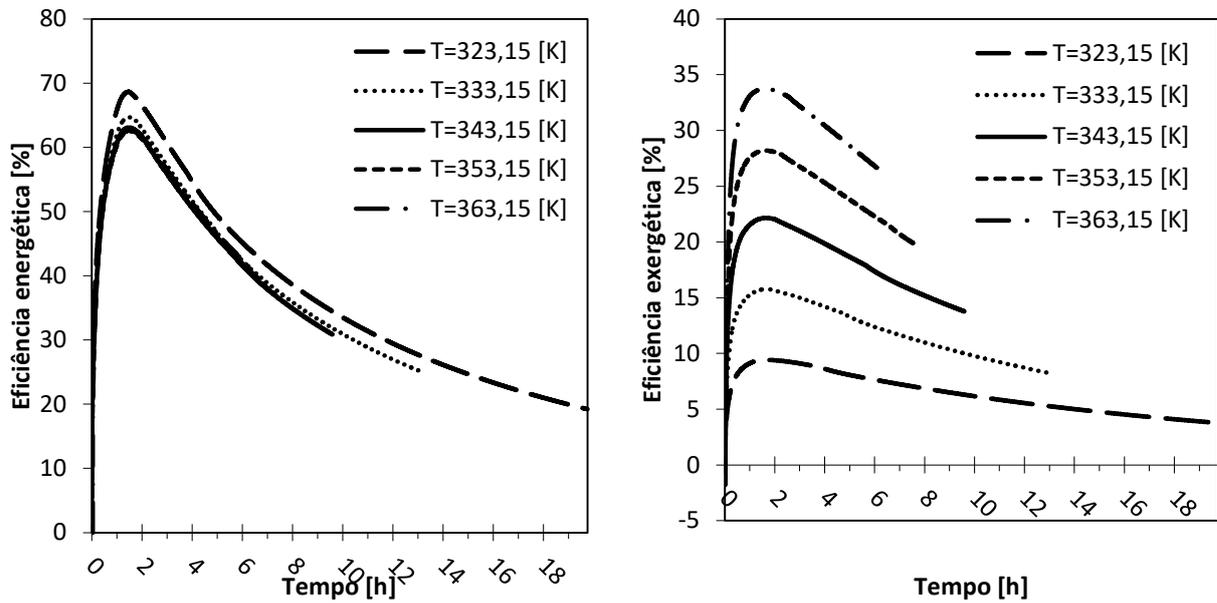
ar na entrada e umidade relativa do ar na entrada se mantiveram fixos durante estas simulações. Velocidade e pressão do ar na entrada estão diretamente relacionadas à vazão mássica de ar de secagem na entrada, ou seja, quanto maior for a velocidade ou pressão na entrada, maior será a vazão mássica. Maiores valores de eficiência energética e exergética (média e pico) foram obtidos com menores vazões mássicas de ar na entrada, porém foram necessários maiores tempos de secagem. Isto se deve ao fato de que, quando aplicado valores mais elevados de vazões mássicas, os grãos tiveram um tempo reduzido para consumir a energia contida no ar de secagem para evaporar a umidade, de forma que uma maior quantidade de entalpia contida no ar aquecido saiu do secador sem ser aproveitada, gerando menores valores de eficiência. Por outro lado, a utilização de menores vazões mássicas do ar de secagem, apesar de obter melhores eficiências, acarreta em uma elevação do teor de umidade do leito de grãos e da umidade relativa do ar intergranular nas regiões mais distantes da entrada do secador. Segundo Ranjbaran et al. (2014), esta última condição pode levar a uma degradação da qualidade dos grãos, devido à maior atividade metabólica destes pela presença de maior percentual de umidade e à possibilidade de geração de mofo.

Figura 30. Efeito da temperatura do ar na entrada do secador nas eficiências energética e exergética (modelo 1D). Parâmetros fixos: $v_{in}=0,65\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $RH_{in}=0,55$.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 31. Efeito da temperatura do ar na entrada do secador nas eficiências energética e exergetica (modelo 2D). Parâmetros fixos: $P_{in}=5000\text{Pa}$ e $RH_{in}=0,55$.



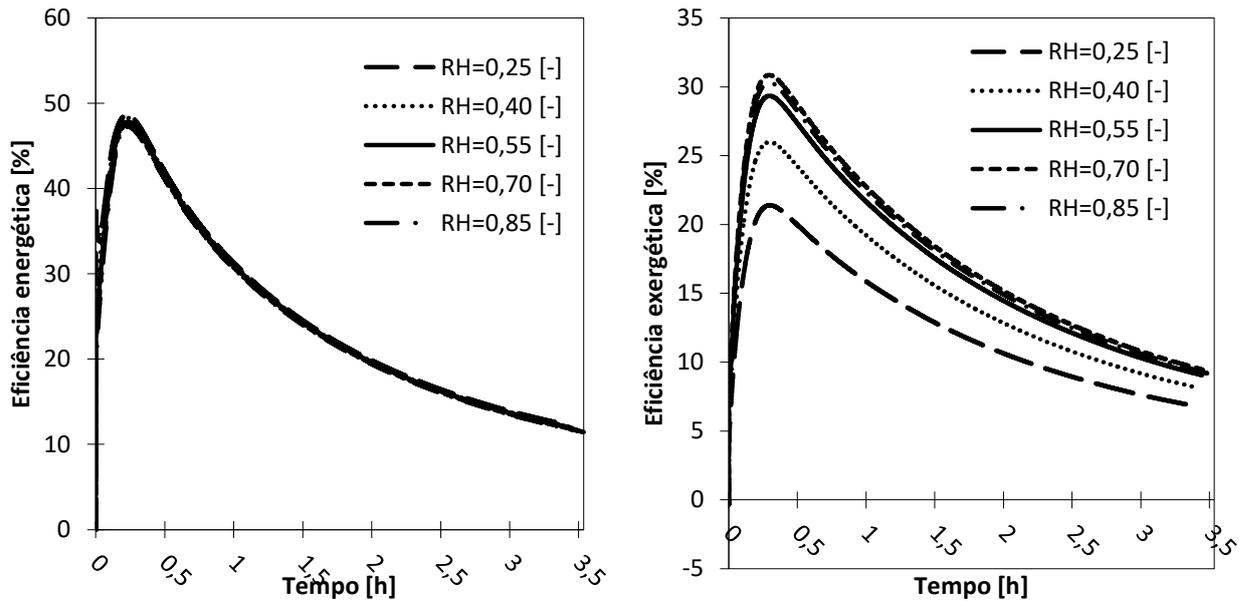
Fonte: elaborado pelo autor.

Os efeitos da temperatura do ar na entrada do secador sobre as eficiências energética e exergetica são mostrados nas Figuras 30 e 31. Os parâmetros velocidade/pressão do ar na entrada e umidade relativa do ar na entrada se mantiveram fixos durante estas simulações. Nota-se que a variação da temperatura na entrada afeta fortemente o tempo de secagem, sendo que quanto menor a temperatura, mais demorada essa será. Em relação à eficiência energética, temperaturas mais elevadas na entrada pouco influenciaram no rendimento de pico da secagem, porém ainda assim produziram menores picos de eficiência, já que uma maior diferença de temperatura entre o ar de entrada e o ambiente de referência aumenta a disponibilidade de energia na entrada e consequentemente o denominador da Eq. (55). Porém, a secagem com temperaturas mais baixas na entrada tendem a levar um tempo muito maior para evaporar a umidade contida nos grãos devido ao menor valor do termo $\frac{\partial M}{\partial t}$ contido no numerador da Eq. (55). Como a secagem é muito mais demorada, aumenta-se muito a exaustão para fora do secador de ar aquecido não aproveitado. Assim, a eficiência energética média da secagem é maior para maiores temperaturas do ar de entrada.

Já em relação à eficiência exergetica, observou-se que valores maiores de temperatura de ar na entrada produziram maiores eficiências, tanto média quanto de pico, e isto se deve ao termo de Carnot $\left(1 - \frac{T_{00}}{T}\right)$ que faz parte da definição de exergia e está presente no numerador

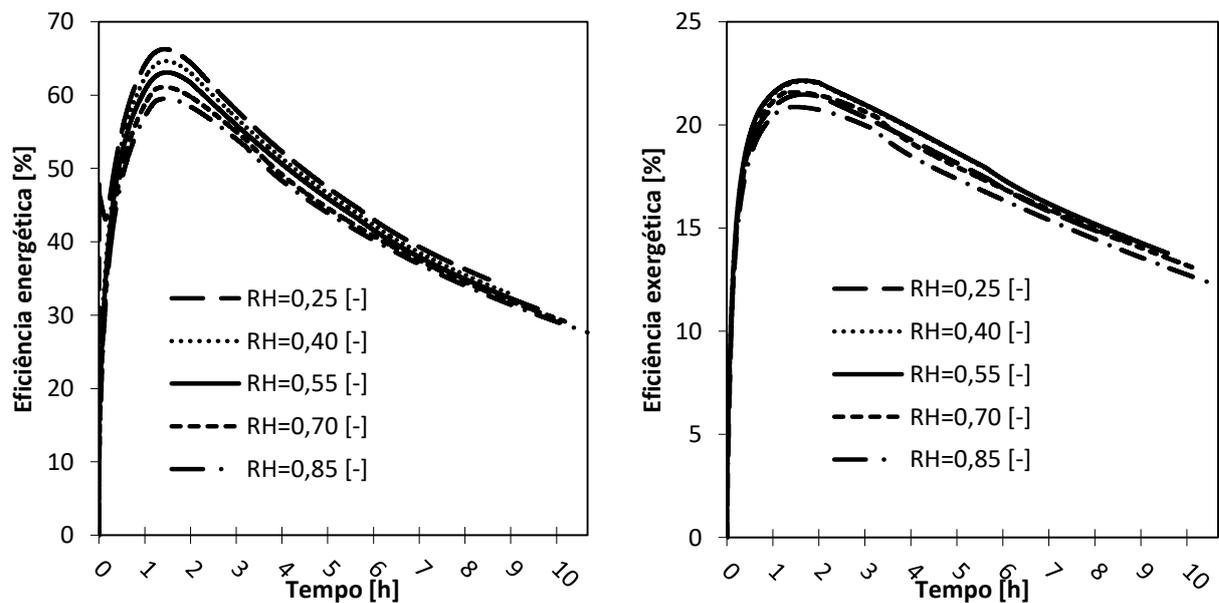
da Eq. (60). Este aumenta consideravelmente à medida que a temperatura do ar se distancia da temperatura de referência. Tal comportamento também foi observado por Amantéa et al. (2013), Ranjbaran e Zare (2013) e Ranjbaran et al. (2014).

Figura 32. Efeito da umidade relativa do ar na entrada do secador nas eficiências energética e exergetica (modelo 1D). Parâmetros fixos: $T_{in}=364,1K$ e $v_{in}=0,65m\cdot s^{-1}$.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 33. Efeito da umidade relativa do ar na entrada do secador nas eficiências energética e exergetica (modelo 2D). Parâmetros fixos: $T_{in}=343,15K$ e $P_{in}=5000Pa$.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os efeitos da umidade relativa do ar na entrada do secador sobre as eficiências energética e exergética são apresentados nas Figuras 32 e 33. Os parâmetros temperatura do ar na entrada e velocidade/pressão do ar na entrada se mantiveram fixos durante estas simulações. Um aumento da umidade relativa do ar conseqüentemente aumenta a umidade absoluta contida neste, tornando-o mais úmido. Notou-se pouca influência da umidade relativa do ar na eficiência energética de secagem (média e de pico), porém ainda assim foi observado que uma menor umidade relativa do ar de entrada reduz ligeiramente o tempo de secagem e aumenta levemente as eficiências de energia. Isso se deve ao fato de que o ar menos úmido na entrada tem maior potencial de retirar umidade dos grãos à medida que esse passa pelo leito de grãos, demorando mais para se tornar saturado, aumentando a taxa de secagem $\frac{\partial M}{\partial t}$ e conseqüentemente o numerador da Eq. (55).

A respeito da eficiência exergética, constatou-se que quanto mais próximo for a umidade absoluta do ar de entrada da umidade absoluta de referência w_{00} , maior será essa eficiência, tanto média quanto de pico. No modelo de escoamento de ar unidimensional, as maiores eficiências exergéticas (média e de pico) se deram para a condição de RH de entrada igual a 0,70, o que equivale a uma umidade absoluta de entrada de $0,0111\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Já para o modelo bidimensional, a maior eficiência exergética de pico se deu para a condição de RH na entrada igual a 0,55, o que equivale a uma umidade absoluta de entrada de $0,0109\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Estas duas condições do ar de entrada mais se aproximam da umidade absoluta de referência, igual a $0,0119\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Esse comportamento ocorre porque quanto mais próximo a umidade absoluta do ar de entrada da umidade absoluta de referência, menor é o valor do termo exergia química da Eq. (58), menor é o valor da taxa de exergia disponível no ar (Eq. (61)), menor é o denominador da Eq. (60) e conseqüentemente maior é a eficiência exergética. Um detalhe ocorreu em relação à eficiência exergética média para o escoamento de ar bidimensional. Esperava-se que a condição de RH na entrada igual a 0,55 apresentasse a maior eficiência exergética média, o que não ocorreu. Apesar disso, a eficiência exergética média para esta condição ficou muito próxima da maior eficiência exergética média (18,19% para condição de RH igual a 0,55 e 18,41% para condição de RH igual a 0,40). Isto pode ter ocorrido devido ao tempo de secagem da condição de RH igual a 0,40 ter sido menor, já que as curvas de eficiência exergética para estas duas condições foram praticamente sobrepostas.

Outra observação a ser feita é que nos primeiros instantes de simulação para várias das condições de secagem estabelecidas na Tabela 8 a temperatura do ar intergranular diminui para valores menores do que a temperatura ambiente de referência T_{00} , resultando em um

valor de eficiência exergética negativo. Isso se deve ao fato de que no início da secagem o ar intergranular ainda não está aquecido e já perde calor para o grão para evaporação da umidade contida neste, fazendo com que sua temperatura fique menor do que a temperatura de referência, o que torna negativo o termo de Carnot $\left(1 - \frac{T_{00}}{T}\right)$ presente no numerador da Eq. (60).

Dessa forma, demonstrou-se que o comportamento das eficiências energética e exergética foi similar para os dois modelos de escoamento de ar (unidimensional e bidimensional), sendo que as variações nos parâmetros de secagem provocaram mudanças semelhantes no comportamento dessas eficiências para ambos os modelos. Tal estudo foi de grande importância, pois visou analisar as perdas energéticas e exergéticas envolvidas no processo de secagem através do cálculo das eficiências. Por meio desta análise, soluções podem ser tomadas a fim de aumentar a eficiência energética e exergética dos secadores, como por exemplo, a variação dos parâmetros de secagem, principalmente do ar de entrada.

7. 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.

Em relação ao software *ANSYS Fluent 18.0*, este se mostrou como uma importante ferramenta na resolução de modelos de secagem de grãos. Sua grande versatilidade pode proporcionar a criação de uma infinidade de geometrias de secadores diferentes para diversas condições de operação de secagem distintas. Já a interface gráfica do software permitiu a visualização de forma clara e precisa do comportamento dos diversos parâmetros envolvidos durante a secagem. Além disso, a utilização da função adicional UDF permitiu a personalização do software e a inclusão de equações para secagem que não estão presentes na versão padrão do mesmo. A função UDF permite ao usuário a criação e solução de modelos matemáticos complexos, sendo de grande ajuda na resolução de problemas de engenharia.

A análise energética e exergetica do leito de grãos de milho também foi objeto de estudo deste trabalho. As eficiências energética e exergetica de secagem, tanto média quanto de pico, foram calculadas para diversas condições de secagem distintas para os dois modelos de escoamento de ar (unidimensional e bidimensional), onde o efeito da variação de parâmetros como velocidade, pressão, temperatura e umidade relativa do ar de secagem na entrada foi investigado. Através do estudo, pode-se notar que menores vazões mássicas de ar na entrada, decorrentes de menores velocidades ou pressões na entrada, produziram maiores eficiências (média e de pico), tanto de energia quanto de exergia. Constatou-se também que menores temperaturas do ar de entrada geraram maiores picos de eficiências energéticas e menores valores de eficiência energética média, porém maiores temperaturas do ar de secagem forneceram maiores eficiências exergeticas. Ainda verificou-se que menores umidades relativas do ar de entrada produziram maiores eficiências energéticas (média e de

pico), enquanto maiores eficiências exergéticas foram obtidas por valores de umidade absoluta do ar de secagem mais próximos da umidade absoluta do estado morto.

A análise energética e exergética de secagem apresenta-se então como uma grande ferramenta para obtenção dos parâmetros de secagem mais eficientes, pois visou analisar as perdas de energia e exergia envolvidas no processo de secagem através do cálculo das eficiências. Através desta análise, soluções podem ser tomadas a fim de aumentar a eficiência da energia gasta nos secadores. Uma dessas soluções é a variação dos parâmetros de secagem, principalmente do ar de entrada, que foi estudada e discutida neste trabalho.

Como trabalhos futuros, pretende-se em uma próxima oportunidade desenvolver um modelo matemático para secagem de milho em leito fixo e camada espessa utilizando um escoamento de ar tridimensional. Seria interessante também obter dados experimentais de um secador de grãos de milho com escoamento de ar tridimensional, onde tais dados poderiam ser utilizados para validar o modelo matemático tridimensional.

Além disso, outra oportunidade de trabalho futuro seria utilizar técnicas de otimização para variar os parâmetros de secagem a fim de se chegar a valores ótimos de eficiência energética/exergética. Seria interessante também realizar uma análise econômica do secador, levando em consideração parâmetros como potência do ventilador e gasto de combustível para aquecimento do ar de secagem, de maneira a otimizar o custo de operação do secador.

Por fim, seria interessante também estudar a influência da variação de outros parâmetros dos secadores nas eficiências energética e exergética, como por exemplo, variação da altura, comprimento e profundidade dos secadores. Este estudo permitiria o projeto e construção de secadores mais eficientes.

REFERÊNCIAS

- AGHBASHLO, M. et al. A review on exergy analysis of drying processes and systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 1-22, 2013.
- AMANTÉA, R. P. et al. Numerical simulation techniques for optimizing thermodynamic efficiencies of cereal grain dryers. **Drying Technology**, v. 31, n. 6, p. 672-683, 2013.
- ANDRADE, E. T. et al. Determinação de propriedades térmicas de grãos de milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 3, p. 488-498, 2004.
- ANSYS Fluent Theory Guide 18.0. Canonsburg: ANSYS Inc., 2017. (a)
- ANSYS Fluent UDF Manual 18.0. Canonsburg: ANSYS Inc., 2017. (b)
- ANSYS Fluent User's Guide 18.0. Canonsburg: ANSYS Inc., 2017. (c)
- ANSYS Fluent Meshing Users Guide 18.0. Canonsburg: ANSYS Inc., 2017. (d)
- AREGBA, A. W.; NADEAU, J. P. Comparison of two non-equilibrium models for static grain deep-bed drying by numerical simulations. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 4, p. 1174-1187, 2007.
- ASAE D245.6. **Moisture relationships of plant-based agricultural products**. Saint Joseph: ASABE, 2007.
- ASAE D272.3. **Resistance to airflow of grains, seeds, other agricultural products, and perforated metal sheets**. Saint Joseph: ASABE, 2011.
- BAKKER-ARKEMA, F. W.; BICKERT, W. G.; PATTERSON, R. J. Simultaneous heat and mass transfer during the cooling of a deep bed of biological products under varying inlet conditions. **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 12, n. 4, p. 297-307, 1967.
- BALA, B. K. **Drying and storage of cereal grains**. 2th ed. Jessore: Willey-Blackwell, 2016. 352 p.
- BARKER, J. Heat transfer in packed beds. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 57, n. 4, p. 43-51, 1956.
- BEJAN, A. et al. **Porous and complex flow structures in modern technologies**. New York: Springer, 2004. 408 p.
- BEJAN, A. **Advanced engineering thermodynamics**. 3th ed. Hoboken: John Wiley e Sons Inc., 2006. 880 p.
- _____. **Convection heat transfer**. 4th ed. New Jersey: Willey, 2013. 696 p.
- BORTOLAIA, L. A. **Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo**. 161 f. Tese de Doutorado. Porto Alegre: UFRGS, 2011.
- BOYCE, D. S. Grain moisture and temperature changes with position and time during through drying. **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 10, n. 4, p. 333-341, 1965.

- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**. Westport: The AVI Publishing Company Inc., 1974. 265 p.
- _____. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinold, 1992. 450 p.
- BROWN, M. T.; ULGIATI, S. 2004. Exergy, transformity, and ecosystem health. In: JORGENSEN, S. E. (Editor). **Handbook of Ecosystem Health**. New York: CRC Press, 2004.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: Mc Graw Hill, 2013. 1048 p.
- COURTOIS, F. et al. Simulation of industrial dryers: solving numerical and computer problems. **Drying Technology**, v. 9, n. 4, p. 927-945, 1991.
- _____. Dynamic modelling and simulation of industrial corn dryers. **Computers and Chemical Engineering**, v. 17, n. 1, p. 209-214, 1993.
- DALPASQUALE, V. A. et al. Fixed-bed drying simulation of agricultural products using a new backward finite difference scheme. **Applied Mathematics and Computation**, v. 200, n. 2, p. 590-595, 2008.
- DEFRAEYE, T. Advanced computational modelling for drying processes - A review. **Applied Energy**, v. 131, p. 323-344, 2014.
- DINCER, I.; SAHIN, A. Z. A new model of thermodynamic analysis of a drying process. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 47, n. 4, p. 645-652, 2004.
- DINCER, I. Exergy as a potential tool for sustainable drying systems. **Sustainable Cities and Society**, v. 1, n. 2, 91-96, 2011.
- DINCER, I.; ZAMFIRESCU, C. **Drying phenomena: theory and applications**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2016. 511 p.
- EMBRAPA Milho e Sorgo. Sistema de Produção, 1 (Versão Eletrônica). 7. ed. 2011. Disponível em: <www.cnpmis.embrapa.br/publicacoes/milho_7_ed/colsecagem.htm#secagem>. Acesso em: 26 abr. 2017.
- ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chemical Engineering Progress**, v. 48, n. 2, p. 89-94, 1952.
- FAGHRI, A.; ZHANG, Y.; HOWELL, J. **Advanced heat and mass transfer**. Columbia: Global Digital Press, 2010. p. 956.
- 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.
- FORTES, M.; OKOS, M. R. Drying theories: their basis and limitations as applied to foods and grains. In: MUJUMDAR, A. S (Editor). **Advances in Drying**. New York: Hemisphere, 1980. p.119-154.
- FORTES, M. et al. 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.
- GARCIA, D. C. et al. Secagem de sementes. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 603-608, 2004.
- GÓRNICKI, K.; KALETA, A. Resistance of bulk grain to airflow - a review. Part I: Equations for airflow resistance. **Agricultural and Forest Engineering**, v. 65, p. 31-41, 2015. (a)

_____. Resistance of bulk grain to airflow - a review. Part II: Effect of process parameters. **Agricultural and Forest Engineering**, v. 65, p. 43-51, 2015. (b)

GONELI, A. L. D. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da Mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**. 186 f. Tese de Doutorado. Viçosa: UFV, 2008.

GUIMARÃES, D. S. **Desenvolvimento de módulo computacional para a secagem estacionária de sementes**. 165 f. Tese de Doutorado. Pelotas: UFPel, 2005.

HENDERSON, J. M.; HENDERSON, S. M. A computational procedure for deep bed drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 13, n. 2, p. 87-95, 1968.

HUKILL, W. V. Drying of grain. In: ANDERSON, J. A.; ALCOCK, A. W. (Editores). **Storage of Cereal Grains and Their Products**. Saint Paul: American Association of Cereal Chemists, 1954. p. 402-435.

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.

IBGE. Agência IBGE - Notícias. Disponível em: <<http://agenciadenoticias.ibge.gov.br>>. Acesso em: 14 out. 2017.

ISTADI, I.; SITOMPUL, J. P. A comprehensive mathematical and numerical modeling of deep-bed grain drying. **Drying Technology**, v. 20, n. 6, p. 1123-1142, 2002.

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.

JAYAS, D. S. et al. Review of thin-layer drying and wetting equations. **Drying Technology**, v. 9, n. 3, p. 551-588, 1991.

KASHANINEJAD, M. et al. Thin-layer drying characteristics and modelling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.

KLAPP, E. Mathematical analysis of simultaneous heat and mass transfer processes in granular materials through which passes a gas. **National Institute of Agricultural Engineering**, v. 32, n. 5, p. 360-372, 1963.

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

LAWS, N.; PARRY, J. L. Mathematical modelling of heat and mass transfer in agricultural grain drying. **Proceedings of The Royal Society**, v. 385, n. 1788, 169-187, 1983.

LEWIS, L. W. The rate of drying of solid materials. **Industrial Engineering Chemistry**, v.13, n. 5, p. 427-432. 1921.

LIU, Q.; BAKKER-ARKEMA, F. W. Automatic control of crossflow grain dryers, part 1: Development of a process model. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 80, n. 1, 81-86, 2001.

LUIKOV, A. V. **Heat and mass transfer in capillary porous bodies**. Oxford: Pergamon Press, 1996. p. 531.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 456 p.

MARTINS, J. H. et al. Simulação de secagem de milho em camada estacionária. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 7, n. 1, p. 5-18, 1982.

MERKLE, C.; VENKATESWARAN, S.; BUELOW, P. The relationship between pressure-based and density-based algorithms. In: **30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit**, Paper 92-0425. Reno, EUA: The American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992.

MISRA, M. K.; BROOKER, D. B. Thin-layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. **ASAE**, Saint Joseph, v. 23, p. 1254-1260, 1980.

MOAVENI, S. **Finite element analysis: theory and application with ANSYS**. 3th ed. London: Pearson Education, 2007. 880 p.

MOUKALLED, F.; DARWISH, M. A high-resolution pressure-based algorithm for fluid flow at all speeds. **Journal of Computational Physics**, v. 168, n. 1, p. 101-130, 2001.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. 1348 p.

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.

NAGLE, R. K.; SAFF, E. B.; SNIDER, A. D. **Equações diferenciais**. 8. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012. 592 p.

NIELD, D.; BEJAN, A. **Convection in porous media**. 4th ed. New York: 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.

ODUM, H. T. **Environmental accounting, emergy and decision making**. New York: John Wiley, 1996. p. 370.

OVERHULTS, D. G. et al. Drying soybeans with heated air. **ASAE**, Saint Joseph, v. 16, n. 1, p. 112-113, 1973.

OZGENER, L.; OZGENER, O. Exergy analysis of industrial pasta drying process. **International Journal of Energy Research**, v. 30, n. 15, p. 1323-1335, 2006.

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

PAGE, C. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. Dissertação de Mestrado. West Lafayette: Purdue University, 1949.

PAKOWSKI, Z. et al. 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.

- PARRY, J. L. Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 32, n. 1, p. 1-29. 1985.
- PARTI, M. Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 54, n. 4, p. 339-352. 1993.
- PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York: Hemisphere, 1980. 214 p.
- PESKE, S. T.; ROSENTHAL, M.; ROTA, G. R. M. **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. Pelotas: UFPel, 2003. 415 p.
- PIXTON, S. W.; GRIFFITHS, J. H. Diffusion of moisture through grain. **Journal of Stored Products Research**, v. 7, n. 3, p. 133-152, 1971.
- PRUKWARUN, W. CFD simulation of fixed bed dryer by using porous media concepts: Unpeeled longan case. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 6, n. 1, p. 100-110, 2013.
- PURI, V. M.; ANANTHESWARAN, R. C. The finite element method in food processing: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 19, n. 3, p. 247-274, 1993.
- RANJBARAN, M.; ZARE, D. CFD modeling of microwave-assisted fluidized bed drying of moist particles using two-fluid model. **Drying Technology**, v. 30, n. 4, p. 362-376, 2012.
- _____. 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. **Modelagem e simulação do processo de resfriamento de grãos armazenados em silos graneleiros por meio das leis de conservação de energia e massa**. 150 f. Tese de doutorado. Viçosa: UFV, 2012.
- ROCHA, K. S. et al. 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.
- RYU, J; JUNG, C.; YI, S. Three-dimensional simulation of humid-air dryer using computational fluid dynamics. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 19, n. 4, 1092-1098, 2013.
- SHARP, J. R. A review of low temperature drying simulation models. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 27, n. 3, p. 169-190, 1982.
- SHEDD, C. K. Resistance of grains and seeds to airflow. **Agricultural Engineering**, v. 34, n. 9, p. 616-619, 1953.
- SILVA, J. S.; NOGUEIRA, R. M.; ROBERTO, C. D. **Tecnologias de secagem e armazenagem para a agricultura familiar**. Viçosa: Suprema, 2005. 138 p.
- SILVA, J. S. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas**. 2. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 560 p.

- SOUZA, G. F. M. V. **Secagem de sementes de soja em leito fixo: equilíbrio e cinética da sílica gel para controle de umidade, modelagem do processo e análise da qualidade das sementes.** 157 f. Tese de Doutorado. Uberlândia: UFU, 2013.
- 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.
- TOPIC, R. Mathematical model for exergy analysis of drying plants. **Drying Technology**, v. 13, n. 1-2, p. 437-445, 1995.
- THORPE, G. R. Moisture diffusion through bulk grain. **Journal of Stored Products Research**, v. 17, n. 1, p. 39-42, 1981.
- _____. Moisture diffusion through bulk grain subjected to a temperature gradient. **Journal of Stored Products Research**, v. 18, n. 1, p. 9-12, 1982.
- _____. 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.
- THORPE, G. R.; OCHOA, J. A.; WHITAKER, S. The diffusion of moisture in food grains. I: The development of a mass transfer equation. **Journal of Stored Products Research**, v. 27, n. 1, p. 1-9, 1991. (a)
- _____. The diffusion of moisture in food grains. II: Estimation of the effective thermal diffusivity. **Journal of Stored Products Research**, v. 27, n. 1, p. 11-30, 1991. (b)
- TURNER, I.; ARUN, S.; MUJUMDAR, A. R.; **Mathematical modeling and numerical techniques in drying technology.** New York: Marcel Dekker, 1997. 679 p.
- USDA. United States Department of Agriculture. Disponível em: <www.ers.usda.gov>. Acesso em: 25 abr. 2017.
- UTLU, Z.; HEPBASLI, A.; TURAN, M. Performance analysis and assessment of an industrial dryer in ceramic production. **Drying Technology**, v. 29, n. 15, p. 1792-1813, 2011.
- VAN ARSDEL, W. B. Simultaneous heat and mass transfer in a nonisothermal system: through-jaw drying in the low-moisture range. **Chemical Engineering Progress Symposium Series**, v. 51, n. 16, p. 47-58, 1955.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics - The finite volume method.** 2th ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007. 520 p.
- VITORINO, R. B. **Modelagem e simulação matemática do processo de secagem de milho.** 52 f. Dissertação de Mestrado. Dourados: UFGD, 2009.
- WARK, K. **Advanced thermodynamics for engineers.** New York: McGraw-Hill, 1995. 576 p.
- 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. et al. Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 18, p. 3241-3254, 2006.

ZARE, M.; CHEN, G. Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, n. 1, p. 78-87, 2009.

APÊNDICE A - Procedimentos para configuração da simulação no ANSYS Fluent 18.0.

Iniciando o ANSYS Fluent 18.0:

- Criar uma nova pasta de trabalho;
- Criar um atalho do ícone do ANSYS Fluent 18.0 e adicioná-lo a nova pasta de trabalho;
- Adicionar o arquivo UDF de formato .c na pasta de trabalho;
- Iniciar o ANSYS Fluent 18.0 pelo arquivo extensão do Microsoft Visual Studio: *x64 Native Tools Command Prompt for VS 2017* (prompt de comando do Windows que permite a utilização de UDF no software ANSYS Fluent 18.0 na plataforma do Windows 64 bits);

Geometria e malha:

- Criar geometria no ANSYS Workbench;
- Gerar malha computacional;
- Definir as regiões de condição de contorno (*inlet, outlet, wall*);
- Exportar a geometria no formato .msh para a pasta de trabalho;

Configurações iniciais do modelo:

- Abrir geometria (*File > Read > Mesh*);
- Checar validade da malha (*Setup > General > Mesh > Check*);
- Checar qualidade da malha (*Setup > General > Mesh > Report Quality*);
- Definir tipo de solução (*Setup > General > Solver > Type > Pressure-Based*);
- Definir tipo de regime no tempo (*Setup > General > Solver > Time > Transient*);
- Definir gravidade (*Setup > General > Gravity*);
- Definir modelos:
 - *Setup > Models > Energy > On*;
 - *Setup > Models > Viscous > Laminar*;
- Definir material - ar (*Setup > Materials > Fluid*):
 - Massa específica: *user-defined > density_air*;
 - Calor específico: *user-defined > specific_heat_air*;
 - Condutividade térmica: *user-defined > thermal_conductivity_air*;
 - Viscosidade: *user-defined > viscosity_air*;
 - Difusividade UDS: *user-defined > eff_moisture_diff_coef*;
- Definir material - milho (*Setup > Materials > Solid*):
 - Massa específica: *user-defined > density_corn*;
 - Calor específico: *user-defined > specific_heat_corn*;
 - Condutividade térmica: *user-defined > thermal_conductivity_corn*;

Habilitando UDF e UDS:

- Adicionar equação UDS (*User Defined > Scalars*):
 - *Number of User-Defined Scalars*: 1;
 - *Solution Zones*: *all fluid zones*;
 - *Flux function*: *mass flow rate*;
 - *Unsteady function*: *default*;
- Definir número de UDMs (*User Defined > Memory*):
 - *Number of User-Defined Memory locations*: 17;
- Interpretar UDF.c (*User Defined > Functions > Interpreted*);
- Definir macros principais em suas posições adequadas (*User Defined > Function Hooks*):
 - *Initialization*: *initialization*;
 - *Adjust*: *grain_moisture_update*;

Definindo as condições da zona ar (*fluid*):

- Abrir/criar zona ar (*fluid*) (*Setup > Cell Zone Conditions*);
- Habilitar *Porous Zone*;
- Definir parâmetros da aba *Porous Zone*:
 - *Direction-1 vector*: *x=0, y=1*;
 - *Viscous resistance direction-1* (vertical-y): *user-defined > viscous_resistance_vertical*;
 - *Viscous resistance direction-2* (horizontal-x): *user-defined > viscous_resistance_horizontal*;
 - *Inertial resistance direction-1* (vertical-y): *user-defined > inertial_resistance_vertical*;
 - *Inertial resistance direction-2* (horizontal-x): *user-defined > inertial_resistance_horizontal*;

- *Fluid porosity*: *user-defined* > *fluid_porosity*;
- *Heat transfer settings*: habilitar *Thermal model* > *Non-Equilibrium*;
- *Solid Zone*: leito de grãos (*solid*);
- *Interfacial area density*: 784 [1/m];
- *Heat transfer coefficient*: *user-defined* > *heat_transfer_coefficient*;
- Habilitar *Source Terms*;
- Definir parâmetros da aba *Source Terms*:
 - Inserir termo fonte da equação de balanço de umidade para o ar: *User Scalar 0* > *user-defined* > *air_moisture_source_term*;
 - *Number of User Scalar 0 sources*: 1;

Definindo as condições da zona leito de grãos (*solid*):

- Abrir/criar zona leito de grãos (*solid*) (*Setup* > *Cell Zone Conditions*);
- Habilitar *Source Terms*;
- Definir parâmetros da aba *Source Terms*:
 - Inserir termo fonte da equação de conservação de energia para o leito de grãos: *Energy* > *user-defined* > *grain_energy_source_term*;
 - *Number of User Scalar 0 sources*: 1;

Definindo condições de contorno (*Setup* > *Boundary conditions*):

- *Inlet* - zona ar (*fluid*): *velocity-inlet*¹ ou *pressure-inlet*²;
 - Na aba *Momentum*, definir velocidade¹ v_{in} ou pressão² P_{in} na entrada;
 - Na aba *Thermal*, definir *temperature* na entrada T_{in} ;
 - Na aba *UDS*: definir *umidade absoluta de entrada do ar*;
 - *User-Defined Scalar Boundary Condition: Specified Value*;
 - *User-Defined Scalar Boundary Value*: w_{in} ;
- *Outlet* - zona ar (*fluid*): (*pressure-outlet*):
 - Na aba *Momentum*, definir *pressão* na saída: P_{atm} ;
 - Na aba *Thermal*, definir *temperature inicial do ar*: T_0 ;
- *Wall* (restante das fronteiras): sem escorregamento, parede adiabática;

Solução:

- Definir métodos de solução (*Solution* > *Methods*):
 - *Pressure-Velocity Coupling*: SIMPLE;
 - *Gradient*: *Least Squares Cell Based*;
 - *Pressure, Momentum, Energy* e *User Scalar 0*: *Second Order Upwind*;
 - *Transient Formulation*: *Second Order Implicit*;
- Definir fatores de relaxamento (*Solution* > *Controls*);
- Definir inicialização (*Solution* > *Inicialization*):
 - Utilizar *Standard Initialization*;
 - *Compute from*: *Inlet* - ar;
- Definir intervalo e local para salvar dados da simulação (*Solution* > *Calculation activities* > *Autosave*);
- Definir intervalo de tempo de simulação Δt , número de intervalos e quantidade máxima de iterações por intervalo de tempo (*Solution* > *Run calculation*);
- Iniciar simulação (*Solution* > *Run calculation*);

¹ Referente ao modelo de escoamento de ar unidimensional.

² Referente ao modelo de escoamento de ar bidimensional.

APÊNDICE B - Principais macros utilizadas na UDF

Macro	Aplicação
Macros DEFINE	
DEFINE_INIT (initialization)	Introduz as condições iniciais do problema, tais como teor de umidade M_0 e temperatura θ_0 do leito de grãos e temperatura T_0 , umidade relativa w_0 e umidade absoluta RH_0 do ar intergranular.
DEFINE_ADJUST (grain_moisture_update)	Atualiza o teor de umidade do leito de grãos a cada intervalo de tempo para cada célula computacional e calcula a eficiência energética e exergética da secagem ao longo do tempo.
DEFINE_SOURCE (air_moisture_source_term)	Calcula o termo fonte da equação de balanço de umidade para o ar S_w .
DEFINE_SOURCE (grain_energy_source_term)	Calcula o termo fonte da equação de conservação de energia para o leito de grãos $S_{h,g}$.
DEFINE_PROFILE (fluid_porosity)	Calcula a porosidade do leito de grãos ε .
DEFINE_PROFILE (heat_transfer_coefficient)	Calcula o coeficiente de transferência de calor entre o ar e o leito de grãos h .
DEFINE_PROFILE (viscous_resistance_vertical)	Calcula a resistência viscosa do escoamento do ar na direção vertical.
DEFINE_PROFILE (viscous_resistance_horizontal)	Calcula a resistência viscosa do escoamento do ar na direção horizontal.
DEFINE_PROFILE (inertial_resistance_vertical)	Calcula a resistência inercial do escoamento do ar na direção vertical.
DEFINE_PROFILE (inertial_resistance_horizontal)	Calcula a resistência inercial do escoamento do ar na direção horizontal.
DEFINE_PROPERTY (density_air)	Calcula a massa específica do ar ρ_a em função de T .
DEFINE_PROPERTY (viscosity_air)	Calcula a viscosidade do ar μ_a em função de T .
DEFINE_PROPERTY (thermal_conductivity_air)	Calcula a condutividade térmica do ar k_a em função de T .
DEFINE_SPECIFIC_HEAT	Calcula o calor específico do ar c_a em função de T e o calor

(specific_heat_air)	específico do vapor c_v , em função de M .
DEFINE_PROPERTY (density_corn)	Calcula a massa específica do grão de milho ρ_g em função de M .
DEFINE_PROPERTY (thermal_conductivity_corn)	Calcula a condutividade térmica do grão de milho k_g em função de M .
DEFINE_SPECIFIC_HEAT (specific_heat_corn)	Calcula o calor específico do grão de milho c_g em função de M e o calor específico da água c_w em função de T .
DEFINE_DIFFUSIVITY (eff_moisture_diff_coef)	Calcula o coeficiente efetivo de difusão de umidade no leito de grãos D_{eff} .

Macros adicionais

C_T(c, t)	Retorna as temperaturas T ou θ da célula.
C_R(c, t)	Retorna as massas específicas ρ_a ou ρ_g da célula.
C_MU_EFF(c, t)	Retorna a viscosidade do ar μ_a .
C_U(c, t)	Retorna a componente u da velocidade.
C_V(c, t)	Retorna a componente v da velocidade.
C_W(c, t)	Retorna a componente w da velocidade.
C_UDSI(c, t, i)	Acessa o valor da i -ésima UDS, onde $i = 0, 1, 2, 3 \dots$
C_UDMI(c, t, i)	Acessa o valor da i -ésima UDM, onde $i = 0, 1, 2, 3 \dots$
C_VOLUME(c, t)	Retorna o volume V da célula.
thread_loop_c(t, d)	Repetição de instruções (<i>loop</i>) por todas as zonas (<i>threads</i>) do domínio (<i>domain</i>) até que se atinjam condições desejadas.
begin_c_loop(c, t) ... end_c_loop(c, t)	Repetição de instruções (<i>loop</i>) por todas as células (<i>cells</i>) de uma zona (<i>thread</i>) até que se atinjam condições desejadas.
RP_Get_Real("flow-time")	Retorna o tempo atual da simulação t .
RP_Get_Real("physical-time-step")	Retorna o intervalo de tempo entre um e outro passo no tempo Δt .
RP_Get_Real("time_step")	Retorna o número do passo no tempo.

APÊNDICE C - Estrutura completa da UDF escrita em linguagem C

```

/*****
/* Análise energética e exergetica da secagem de grãos de milho em leito fixo utilizando o modelo CFD */
/*
/* Criado por: Estêvão Lannes Tolentino */
/* Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) */
/* Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil */
/* estevaotolentino@hotmail.com */
/*
/* Utilização da memória scalar (UDSs): */
/* UDS 0 - w (umidade absolutado do ar, base seca [kg_água/kg_ar]) */
/*
/* Utilização das memórias (UDMs): */
/* UDM 0 - M (teor de umidade do leito de grãos, base seca [kg_água/kg_ar]) */
/* UDM 1 - RH (umidade relativa do ar [-]) */
/* UDM 2 - dMdt (variação do teor de umidade do leito de grãos [1/s]) */
/* UDM 3 - Hfg (calor latente de vaporização da água [J/kg]) */
/* UDM 4 - Sw (termo fonte da equação de balanço de umidade do ar [kg/(m^3*s)]) */
/* UDM 5 - Sh_grain (termo fonte da equação de balanço de energia para o leito de grãos [W/m^3]) */
/* UDM 6 - hc (coeficiente de transferência de calor entre o ar e o leito de grãos [W/(m^2*K)]) */
/* UDM 7 - rho_corn (massa específica do milho [kg/m^3]) */
/* UDM 8 - k_corn (condutividade térmica do milho [W/(m*K)]) */
/* UDM 9 - eff_moisture_diffusion_coefficient */
/* UDM 10 - fluid_porosity (porosidade do leito de grãos [-]) */
/* UDM 11 - viscous_resistance_vertical (resistência viscosa ao escoamento de ar na vertical [1/m^2]) */
/* UDM 12 - viscous_resistance_horizontal (resistência viscosa ao escoamento de ar na horizontal [1/m^2]) */
/* UDM 13 - inertial_resistance_vertical (resistência inercial ao escoamento de ar na vertical [1/m]) */
/* UDM 14 - inertial_resistance_horizontal (resistência inercial ao escoamento de ar na horizontal [1/m]) */
/* UDM 15 - E_evp (energia demandada para evaporação da umidade dos grãos [W]) */
/* UDM 16 - Ex_evp (exergia demandada para evaporação da umidade dos grãos [W]) */
*****/

#include "udf.h" /* Este cabeçalho (header) deve ser incluído no começo do código fonte de todos UDFs */
#define M_inicial /* Teor de umidade inicial do leito de grãos (milho) [kg/kg] */
#define T_air_inicial /* Temperatura inicial do ar intergranular [K] */
#define theta_grain_inicial /* Temperatura inicial do leito de grãos [K] */
#define P_atm /* Pressão atmosférica ambiente [Pa] */
#define T_0 /* Temperatura ambiente de referência (estado morto) [K] */
#define P_0 /* Pressão ambiente de referência (estado morto) [Pa] */
#define w_0 /* Umidade absoluta do ar de referência, bulbo seco (estado morto) [kg/kg] */
#define T_in /* Temperatura do ar de entrada [K] */
#define w_in /* Umidade absoluta do ar de entrada, bulbo seco [kg/kg] */
#define R_air 287 /* Constante universal dos gases para o ar [J/(kg*K)] */
#define R 719 /* Coeficiente R para o milho [Pa*s/m^2] */
#define S 6855 /* Coeficiente S para o milho [Pa*s^2/m^3] */
int last_timestep = -1;
int zone_ID_air = -; /* ID da zona ar (fluido/porosa) */
int zone_ID_inlet = -; /* ID da zona de entrada */
FILE *fp; /* Cria um ponteiro para um arquivo externo */

DEFINE_INIT(initialization, d) /* Introduce values initial of temperature, teor de umidade dos grãos e umidade absoluta do ar */
{
    real T_abs, Pvs, RH, w;
    Thread *t;
    cell_t c;
    thread_loop_c(t, d)

```

```

{
  begin_c_loop(c, t)
  {
    if (THREAD_ID(t) == zone_ID_air) /* Procura no domínio pela região de fluido/porosa */
    {
      C_T(c, t) = T_air_inicial; /* Define temperatura inicial para todo o ar intergranular */
      C_UDMI(c, t, 0) = M_inicial; /* Define e guarda na memória (UDM 0) teor de umidade inicial
      para todo o leito de grãos */
      Pvs = 100 * exp(27.0214 - (6887 / T_air_inicial) - (5.31 * log(T_air_inicial / 273.16))); /* Eq. (24)
      - Pressão de vapor saturado do ar [Pa] */
      RH = 1 - exp(-0.688 * (T_air_inicial - 227) * pow(M_inicial, 2)); /* Eq. (78) - Umidade relativa
      do ar inicial [-] */
      if (RH > 0.999) /* Limita a umidade relativa de ultrapassar 100% */
      {
        RH = 0.999;
      }
      w = (Pvs * RH * 0.62189) / (P_atm - Pvs * RH); /* Eq. (79) - Umidade absoluta do ar inicial
      [kg/kg] */
      C_UDSI(c, t, 0) = w; /* Guarda na memória do scalar (UDS 0) umidade absoluta inicial do ar
      [kg/kg] */
    }
    else
    {
      C_T(c, t) = theta_grain_inicial; /* Define temperatura inicial para todo o leito de grãos */
    }
  }
  end_c_loop(c, t)
}
}

```

DEFINE_ADJUST(grain_moisture_update, d) /* Atualiza o teor de umidade do grão a cada passo de tempo para cada célula computacional de acordo com a temperatura e umidade absoluta do ar intergranular. Realiza análise de energia e exergia a cada passo de tempo */

```

{
  real n_ts, time_step, time, M, w, T_abs, Pvs, RH, Me, dMdt, Mnew, Hfg, a, b, t_m_dot_in, t_P_in, n,
  m_dot_in;
  real V, E, rho_corn, P_in, cp_air_in, cp_vapor_in, E_in, Ex_in, E_evap, Ex_evap, t_E_evap, t_Ex_evap,
  d_E_evap, d_Ex_evap, etta_E, etta_Ex;
  Thread *t;
  cell_t c;
  face_t f;
  n_ts = RP_Get_Integer ("time-step"); /* Retorno o número da iteração */
  time_step = RP_Get_Real ("physical-time-step"); /* Retorna o intervalo de tempo entre uma e outra iteração
  Δt [s] */
  time = RP_Get_Real ("flow-time"); /* Retorna o tempo corrente real da simulação [s] */
  if (last_timestep != n_ts)
  {
    last_timestep = n_ts;
    thread_loop_c(t, d)
    {
      if (THREAD_ID(t) == zone_ID_air) /* Zona ar (fluida/porosa) */
      {
        begin_c_loop(c, t)
        {
          /****** Atualização do teor de umidade do leito de grãos *****/
          M = C_UDMI(c, t, 0); /* Busca na memória (UDM 0) teor de umidade do leito de grãos */
          w = C_UDSI(c, t, 0); /* Busca na memória do scalar (UDS 0) umidade absoluta do ar */
          T_abs = C_T(c, t); /* Busca temperatura do ar */
          Pvs = 100 * exp(27.0214 - (6887 / T_abs) - (5.31 * log(T_abs / 273.16))); /* Eq. (24) - Pressão
          de vapor saturado do ar [Pa] */

```

```

RH = (P_atm * w) / (Pvs * (0.62189 + w)); /* Eq. (23) - Umidade relativa do ar [-] */
if (RH > 0.999) /* Limita a umidade relativa de ultrapassar 100% */
{
    RH = 0.999;
}
C_UDMI(c, t, 1) = RH; /* Guarda na memória (UDM 1) umidade relativa do ar [-] */
a = -4.10497 + 0.008784 * T_abs; /* Eq. (20) */
b = 1.66209e9 * exp(-5.9418e-2 * T_abs); /* Eq. (21) */
Me = pow(log(1 - RH) / (-0.688 * (T_abs - 227)), 0.5); /* Eq. (22) */
dMdt = (Me - M) / (3600 * pow(pow(a, 2) + pow(900, -1) * b * time, 0.5)); /* Eq. (19) */
Mnew = (time_step * dMdt) + M; /* Eq. (80) - Novo valor para teor de umidade no leito de
grãos [kg/kg] */
C_UDMI(c, t, 0) = Mnew; /* Guarda na memória (UDM 0) teor de umidade inicial para todo o
leito de grãos [kg/kg], substituindo o valor antigo */
C_UDMI(c, t, 2) = dMdt; /* Guarda na memória (UDM 2) taxa de secagem para o leito de
grãos, substituindo o valor antigo */
/****** Cálculo do calor latente de vaporização da água contida nos grãos *****/
Hfg = (3153518.6 - 2386.05 * T_abs) * (1 + 4.35 * exp(-28.25 * Mnew)); /* Eq. (37) - Calor
latente de vaporização da água [J/kg] */
C_UDMI(c, t, 3) = Hfg; /* Guarda na memória (UDM 3) calor latente de vaporização da água
[J/kg] */
/****** Análise energética e exergética *****/
V = C_VOLUME(c, t); /* Calcula o volume de cada uma das células do domínio */
E = C_UDMI(c, t, 10); /* Busca (UDM 10) porosidade do leito de grãos */
rho_corn = C_UDMI(c, t, 7); /* Busca (UDM 7) massa específica do milho */
E_evap = -(1 - E) * rho_corn * dMdt * Hfg * V; /* Energia demandada para evaporação da
umidade dos grãos para cada uma das N células computacionais do domínio */
if (E_evap < 0) /* Para E_evap nunca ficar negativo */
{
    E_evap = 0;
}
Ex_evap = E_evap * (1 - (T_0 / T_abs)); /* Exergia demandada para evaporação da umidade dos
grãos para cada uma das N células computacionais do domínio */
C_UDMI(c, t, 15) = E_evap; /* Guarda na memória (UDM 15) o termo E_evap */
C_UDMI(c, t, 16) = Ex_evap; /* Guarda na memória (UDM 16) o termo Ex_evap */
t_E_evap += E_evap;
t_Ex_evap += Ex_evap;
}
end_c_loop(c, t)
d_E_evap += t_E_evap; /* Somatória de toda a energia demandada para evaporação da umidade dos
grãos para cada uma das N células computacionais do domínio */
d_Ex_evap += t_Ex_evap; /* Somatória de toda a exergia demandada para evaporação da umidade
dos grãos para cada uma das N células computacionais do domínio */
}
}
thread_loop_f(t, d)
{
    if (THREAD_ID(t) == zone_ID_inlet) /* Zona de entrada de ar */
    {
        begin_f_loop(f, t)
        {
            t_m_dot_in += ABS(F_FLUX(f, t));
            t_P_in += F_P(f, t);
            n = n + 1; /* Número de células da zona de entrada */
        }
        end_f_loop(f, t)
        m_dot_in = t_m_dot_in; /* Cálculo da vazão mássica na entrada [kg/s] */
        P_in = t_P_in / n; /* Cálculo da pressão manométrica na entrada [Pa] */
    }
}
}

```

```

cp_air_in = 1009.26 - 4.0403e-3 * (T_in - 273.15) + 6.1759e-4 * pow((T_in - 273.15), 2) - 4.097e-7 *
pow((T_in - 273.15), 3); /* Eq. (47) - Calor específico do ar de entrada [J/(kg*K)] */
cp_vapor_in = 1883 - 1.6737e-1 * T_in + 8.439e-4 * pow(T_in, 2) - 2.6967e-7 * pow(T_in, 3); /* Eq.
(48) - Calor específico do vapor de entrada [J/(kg*K)] */
E_in = m_dot_in * (cp_air_in + w_in * cp_vapor_in) * (T_in - T_0); /* Eq. (56) - Energia que entra no
sistema pelo ar de secagem */
Ex_in = m_dot_in * (cp_air_in + w_in * cp_vapor_in) * (T_in - T_0 - T_0 * log(T_in / T_0)) + (1 +
1.608 * w_in) * R_air * T_0 * log((P_in + P_atm) / P_0) + R_air * T_0 * ((1 + 1.608 * w_in) * log((1 +
1.608 * w_0) / (1 + 1.608 * w_in)) + 1.608 * w_in * log((1.608 * w_in) / (1.608 * w_0))); /* Eq. (61) -
Exergia que entra no sistema pelo ar de secagem */
etta_E = 100 * d_E_evap / E_in; /* Eq. (55) - Eficiência energética do processo de secagem [%] */
etta_Ex = 100 * d_Ex_evap / Ex_in; /* Eq. (60) - Eficiência exergética do processo de secagem [%] */
printf("Energy efficiency = %g \n", etta_E); /* Mostrar nas mensagens do ANSYS a eficiência energética
*/
printf("Exergy efficiency = %g \n", etta_Ex); /* Mostrar nas mensagens do ANSYS a eficiência
exergética*/
fp = fopen("data.txt", "a"); /* Abre um arquivo externo, cujo diretório é o mesmo dos dados da
simulação. Este arquivo será utilizado para exportar alguns dados da secagem */
fprintf(fp, "%f;%f;%f\n", time, etta_E, etta_Ex); /* Exporta os valores do tempo corrente de simulação,
eficiência energética e eficiência exergética para um arquivo externo */
fclose(fp); /* Fecha o arquivo externo */
}
}

DEFINE_SOURCE(air_moisture_source_term, c, t, dS, eqn) /* Calcula o termo fonte da equação de
transferência de umidade para o ar (Eq. 18) e retorna-o ao solucionador */
{
real dMdt, rho_corn, E, Sw;
dMdt = C_UDMI(c, t, 2); /* Busca na memória (UDM 2) taxa de secagem para o leito de grãos */
rho_corn = C_UDMI(c, t, 7); /* Busca na memória (UDM 7) massa específica do milho */
E = C_UDMI(c, t, 10); /* Busca na memória (UDM 10) porosidade do leito de grãos */
Sw = -(1 - E) * rho_corn * dMdt; /* Eq. (18) - Termo fonte da equação de balanço de umidade para o ar
[kg/(m^3*s)] */
dS[eqn] = 0.0;
C_UDMI(c, t, 4) = Sw; /* Guarda na memória (UDM 4) termo fonte da equação de transferência de umidade
para o ar */
return Sw;
}

DEFINE_SOURCE(grain_energy_source_term, c, t, dS, eqn) /* Calcula o termo fonte da equação de balanço de
energia para o leito de grão (Eq. 44) e retornando-o ao solucionador */
{
real T_grain, T_air, M, dMdt, Hfg, hc, rho_corn, E, cp_vapor, Sh_grain;
Domain *d = Get_Domain(1); /* Busca o domínio atual */
Thread *t_porous = Lookup_Thread(d, zone_ID_air); /* Busca zona ar (fluido/porosa) */
T_grain = C_T_M1(c, t); /* Temperatura do leito de grãos da iteração passada */
T_air = C_T_M1(c, t_porous); /* Temperatura do ar da iteração passada */
M = C_UDMI(c, t_porous, 0); /* Busca na memória (UDM 0) teor de umidade do leito de grãos */
dMdt = C_UDMI(c, t_porous, 2); /* Busca na memória (UDM 2) taxa de secagem para o leito de grãos */
Hfg = C_UDMI(c, t_porous, 3); /* Busca na memória (UDM 3) calor latente de vaporização da água */
hc = C_UDMI(c, t_porous, 6); /* Busca na memória (UDM 6) coeficiente de transferência de calor */
rho_corn = C_UDMI(c, t_porous, 7); /* Busca na memória (UDM 7) massa específica do milho */
E = C_UDMI(c, t_porous, 10); /* Busca na memória (UDM 10) porosidade do leito de grãos */
cp_vapor = 1883 - 1.6737e-1 * T_air + 8.439e-4 * pow(T_air, 2) - 2.6967e-7 * pow(T_air, 3); /* Eq. (48) -
Calor específico do vapor [J/(kg*K)] */
Sh_grain = (Hfg + cp_vapor * (T_air - T_grain)) * (1 - E) * rho_corn * dMdt; /* Eq. (44) - Termo fonte da
equação de balanço de energia para o leito de grãos [W/m^3] */
if (Sh_grain > 0) /* "Sh_grain" deve ser sempre menor ou igual a zero, pois o leito de grãos está perdendo
calor para evaporar a água */
{

```

```

    Sh_grain = 0;
}
dS[eqn] = 0.0;
C_UDMI(c, t_porous, 5) = Sh_grain; /* Guarda na memória (UDM 5) termo fonte da equação de balanço de
energia para o leito de grão */
return Sh_grain;
}

/***** VARIACÃO DAS PROPRIEDADES NO TEMPO *****/

DEFINE_PROPERTY(viscosity_air, c, t) /* Viscosidade do ar em função de T variando no tempo */
{
    real mu_air, T_abs;
    T_abs = C_T(c, t); /* Busca temperatura do ar */
    mu_air = 1.691e-5 + 4.984e-8 * (T_abs - 273.15) - 3.187e-11 * pow((T_abs - 273.15), 2) + 1.319e-14 *
    pow((T_abs - 273.15), 3); /*Eq. (46) - Viscosidade do ar [Pa*s] */
    return mu_air;
}

DEFINE_PROPERTY(density_air, c, t) /* Massa específica do ar em função de T variando no tempo */
{
    real rho_air, T_abs, w;
    T_abs = C_T(c, t); /* Busca temperatura do ar */
    w = C_UDSI(c, t, 0); /* Busca umidade absoluta do ar */
    rho_air = 0.6219 * P_atm / (287 * T_abs * (0.6219 + w)); /* Eq. (45) - Massa específica do ar [kg/m^3] */
    return rho_air;
}

DEFINE_PROPERTY(thermal_conductivity_air, c, t) /* Condutividade térmica do ar em função de T variando
no tempo */
{
    real k_air, T_abs;
    T_abs = C_T(c, t); /* Busca temperatura do ar */
    k_air = 7.331e-5 * T_abs + 0.004071; /* Eq. (49) - Condutividade térmica do ar [W/(m*K)] */
    return k_air;
}

DEFINE_SPECIFIC_HEAT(specific_heat_air, T, Tref, h, yi) /* Calor específico do ar em função de T variando
no tempo */
{
    real cp_air, cp_vapor, w, time_h;
    time_h = RP_Get_Real("flow-time") / 3600; /* Tempo de simulação em hora */
    w = - /* Ajuste polinomial da umidade relativa média para todo o leito de grãos em função do tempo de
secagem (time_h) */
    cp_air = 1009.26 - 4.0403e-3 * (T - 273.15) + 6.1759e-4 * pow((T - 273.15), 2) - 4.097e-7 * pow((T -
273.15), 3); /* Eq. (47) - Calor específico do ar [J/(kg*K)] */
    cp_vapor = 1883 - 1.6737e-1 * T_air + 8.439e-4 * pow(T_air, 2) - 2.6967e-7 * pow(T_air, 3); /* Eq. (48) -
Calor específico do vapor [J/(kg*K)] */
    *h = (cp_air + cp_vapor * w) * (T - Tref); /* Entalpia do ar [J/kg] */
    return (cp_air + cp_vapor * w);
}

DEFINE_PROPERTY(density_corn, c, t) /* Massa específica do milho em função de M variando no tempo */
{
    real rho_corn, M, E;
    Domain *d = Get_Domain(1); /* Busca o domínio atual */
    Thread *t_porous = Lookup_Thread(d, zone_ID_air); /* Busca a zona ar (fluido/porosa) */
    M = C_UDMI(c, t_porous, 0); /* Busca na memória (UDM 0) teor de umidade do leito de grãos */
    E = C_UDMI(c, t_porous, 10); /* Busca na memória (UDM 10) porosidade do leito de grãos */
}

```

```

rho_corn = (702.76 + 595.71 * (M / (1 + M)) - 3434 * pow(M / (1 + M), 2)) / (1 - E); /* Eq. (50) – Massa
específica dos grãos de milho */
C_UDMI(c, t_porous, 7) = rho_corn; /* Guarda na memória (UDM 7) massa específica dos grãos de milho */
return rho_corn;
}

DEFINE_PROPERTY(thermal_conductivity_corn, c, t) /* Condutividade térmica do milho em função de M
variando no tempo */
{
    real M, E, k_corn;
    Domain *d = Get_Domain(1); /* Busca o domínio atual */
    Thread *t_porous = Lookup_Thread(d, zone_ID_air); /* Busca a zona ar (fluido/porosa) */
    M = C_UDMI(c, t_porous, 0); /* Busca na memória (UDM 0) teor de umidade do leito de grãos */
    E = C_UDMI(c, t_porous, 10); /* Busca na memória (UDM 10) porosidade do leito de grãos */
    k_corn = 0.10473 + 0.434 * (M / (1 + M)); /* Eq. (53) - Condutividade térmica do milho - [W/(m*K)] */
    C_UDMI(c, t_porous, 8) = k_corn; /* Guarda na memória (UDM 8) condutividade térmica do milho */
    return k_corn;
}

DEFINE_SPECIFIC_HEAT(specific_heat_corn, T, Tref, h, yi) /* Calor específico do milho em função de M
variando no tempo */
{
    real time_h, M, cp_corn;
    time_h = RP_Get_Real("flow-time") / 3600; /* Tempo de simulação em hora */
    M = - /* Ajuste polinomial do teor de umidade médio do leito de grãos em função do tempo (time_h) */
    cp_corn = 1132.7 + 5445.3 * (M / (1 + M)); /* Eq. (52) - Calor específico do milho [J/(kg*K)] */
    *h = cp_corn * (T - Tref); /* Entalpia do leito de grãos [J/kg] */
    return cp_corn;
}

DEFINE_PROFILE(fluid_porosity, t, nv) /* Porosidade em função de M variando no tempo */
{
    real M;
    cell_t c;
    begin_c_loop(c, t)
    {
        M = C_UDMI(c, t, 0); /* Busca na memória (UDM 0) teor de umidade do leito de grãos */
        C_PROFILE(c, t, nv) = 0.39 + 0.095 * M; /* Eq. (51) - Porosidade do leito de grãos [-] */
        C_UDMI(c, t, 10) = C_PROFILE(c, t, nv); /* Guarda na memória (UDM 10) porosidade do leito de
grãos */
    }
    end_c_loop(c, t)
}

DEFINE_PROFILE(heat_transfer_coefficient, t, nv) /* Coeficiente de transferência de calor entre o ar e o leito
de grãos */
{
    real velocity_x, velocity_y, G_air, rho_air, cp_air, mu_air, r_0;
    cell_t c;
    r_0 = 0.00451; /* Raio equivalente do grão de milho [m] */
    begin_c_loop(c, t)
    {
        velocity_x = C_U(c, t); /* Busca componente x da velocidade */
        velocity_y = C_V(c, t); /* Busca componente y da velocidade */
        rho_air = C_R(c, t); /* Busca massa específica do ar */
        cp_air = C_CP(c, t); /* Busca calor específico do ar */
        mu_air = C_MU_EFF(c, t); /* Busca viscosidade do ar */
        G_air = rho_air * pow(pow(velocity_x, 2) + pow(velocity_y, 2), 0.5);
        C_PROFILE(c, t, nv) = 0.2755 * G_air * cp_air * pow(2 * r_0 * G_air / mu_air, -0.34); /* Eq. (30) -
Coeficiente de transferência de calor */
    }
}

```

```

    C_UDMI(c, t, 6) = C_PROFILE(c, t, nv);
}
end_c_loop(c, t)
}

DEFINE_DIFFUSIVITY(eff_moisture_diff_coef, c, t, i) /* Coeficiente de difusão de umidade efetiva
variando em função de T */
{
    real rho_air, Deff, T_abs;
    T_abs = C_T(c, t); /* Busca temperatura do ar */
    rho_air = C_R(c, t); /* Busca massa específica do ar */
    Deff = 1.0673e-2 * exp(-31541.2931 / (8.314 * T_abs)); /* Eq. (15) - Coeficiente de difusão de umidade
efetiva [m2/s] */
    C_UDMI(c, t, 9) = Deff; /* Guarda na memória (UDM 11) coeficiente de difusão de umidade efetiva */
    return rho_air * Deff; /* Massa específica do ar para torna a equação dimensionalmente correta */
}

DEFINE_PROFILE(viscous_resistance_vertical, t, nv) /* Resistência viscosa na direção vertical */
{
    real mu_air;
    cell_t c;
    begin_c_loop(c, t)
    {
        mu_air = C_MU_EFF(c, t); /* Busca viscosidade do ar */
        C_PROFILE(c, t, nv) = R / mu_air; /* Resistência viscosa na direção vertical [1/m^2] */
        C_UDMI(c, t, 11) = C_PROFILE(c, t, nv); /* Guarda na memória (UDM 11) a resistência viscosa na
direção vertical */
    }
    end_c_loop(c, t)
}

DEFINE_PROFILE(viscous_resistance_horizontal, t, nv) /* Resistência viscosa na direção horizontal */
{
    real mu_air;
    cell_t c;
    begin_c_loop(c, t)
    {
        mu_air = C_MU_EFF(c, t); /* Busca viscosidade do ar */
        C_PROFILE(c, t, nv) = 0.70 * R / mu_air; /* Resistência viscosa na direção horizontal [1/m^2] */
        C_UDMI(c, t, 12) = C_PROFILE(c, t, nv); /* Guarda na memória (UDM 12) a resistência viscosa na
direção horizontal */
    }
    end_c_loop(c, t)
}

DEFINE_PROFILE(inertial_resistance_vertical, t, nv) /* Resistência inercial na direção vertical */
{
    real rho_air;
    cell_t c;
    begin_c_loop(c, t)
    {
        rho_air = C_R(c, t); /* Busca massa específica do ar */
        C_PROFILE(c, t, nv) = 2 * S / rho_air; /* Resistência inercial na direção vertical [1/m] */
        C_UDMI(c, t, 13) = C_PROFILE(c, t, nv); /* Guarda na memória (UDM 13) a resistência inercial na
direção vertical */
    }
    end_c_loop(c, t)
}

DEFINE_PROFILE(inertial_resistance_horizontal, t, nv) /* Resistência inercial na direção horizontal */

```

```
{
  real rho_air;
  cell_t c;
  begin_c_loop(c, t)
  {
    rho_air = C_R(c, t); /* Busca massa específica do ar */
    C_PROFILE(c, t, nv) = 0.70 * 2 * S / rho_air; /* Resistência inercial na direção horizontal [1/m] */
    C_UDMI(c, t, 14) = C_PROFILE(c, t, nv); /* Guarda na memória (UDM 14) a resistência inercial na
    direção horizontal */
  }
  end_c_loop(c, t)
}
```