



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

DISSERTAÇÃO

FERNANDO AZALIM JÚNIOR

ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DA SECAGEM DE MILHO EM SECADOR CILÍNDRICO COM FLUXO VERTICAL DE AR UTILIZANDO O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

Belo Horizonte
2022

Fernando Azalim Júnior

**ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DA SECAGEM DE MILHO EM
SECADOR CILÍNDRICO COM FLUXO VERTICAL DE AR UTILIZANDO O
MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

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

Linha de Pesquisa: Eficiência Energética

Belo Horizonte
2022

Azalim Júnior, Fernando

A991a Análise energética e exergetica da secagem de milho em secador cilíndrico com fluxo vertical de ar utilizando o método dos volumes finitos / Fernando Azalim Júnior. – 2022.
106 f. : il., gráfs, tabs.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Orientador: José Leôncio Fonseca de Souza.

Banca examinadora: José Leôncio Fonseca de Souza, André Guimarães Ferreira e Rafael Pinheiro Amantéa.

Bibliografia: f. 87-92.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Milho – Secagem – Teses. 2. Método de volume finito – Teses.
3. Fluidodinâmica computacional – Teses. 4. Energia – Análise – Teses.
5. Exergia – Análise – Teses. I. Souza, José Leôncio Fonseca. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDD 620.1064

Fernando Azalim Júnior

ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DA SECAGEM DE MILHO EM SECADOR CILÍNDRICO COM
FLUXO VERTICAL DE AR UTILIZANDO O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

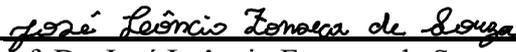
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Linha de Pesquisa: Eficiência Energética

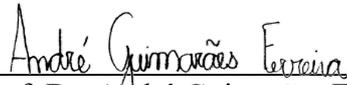
Belo Horizonte, 05 de julho de 2022

Resultado: Aprovado

Banca Examinadora:



Prof. Dr. José Leônicio Fonseca de Souza.
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG



Prof. Dr. André Guimarães Ferreira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG



Prof. Dr. Rafael Pinheiro Amantéa
Instituição de Educação Tecnológica – IETEC

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho
aos meus pais,
à minha família,
aos meus amigos
e à Deus.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me manteve forte durante essa jornada e iluminou minhas veredas nas horas de dificuldade. Tudo foi possível graças a Ele.

À minha família, pelo apoio incondicional, e em especial aos meus pais Fernando e Walquíria, que foram vitais para essa conquista. Sempre me deram apoio e amor em tudo que me propus a fazer.

Ao meu orientador José Leôncio, que além de ser um grande professor, se mostrou um grande amigo me dando apoio para que concluir essa pesquisa.

Aos professores André Guimarães e Rafael Amantéa, por terem aceitado o convite de participar da banca examinadora.

Ao CEFET-MG, por ter me proporcionado realizar o sonho de fazer um mestrado de qualidade.

Aos meus amigos que me deram conselhos, escutaram desabafos e me deram forças para terminar o mestrado, o meu muito obrigado.

RESUMO

A secagem de grãos é um processo térmico para remoção de umidade de produtos agrícolas a fim de preservar a qualidade. Porém, este processo possui um alto gasto energético, que varia de 10 a 25% do uso nacional da energia a cada ano. Logo, são relevantes os estudos referentes a secagem, a fim de se conseguir o uso mais eficiente dos recursos energéticos. O presente trabalho realizou o estudo de um modelo matemático de secagem de grãos de milho em leito fixo. O modelo matemático utilizado foi baseado na literatura consultada e os resultados numéricos foram resolvidos através do Método dos Volumes Finitos com o software *ANSYS Fluent*, e com a ferramenta *User-Defined Function* (UDF). Os dados experimentais foram obtidos do trabalho de Dias (2019) que realizou 6 experimentos utilizando as temperaturas 40, 50 e 60°C e as velocidades 0,8 e 1,3 m.s⁻¹ para o ar de secagem em um secador cilíndrico com 130mm de diâmetro e 200mm de altura. Os dados experimentais da literatura foram confrontados com os resultados numéricos para validação do modelo matemático de secagem de grãos em leito fixo. A validação do modelo matemático considerou 3 parâmetros estatísticos: o coeficiente de determinação (R^2), a raiz do erro quadrático médio ($RMSE$) e o percentual BIAS ($PBIAS$) e a variável utilizada foi o teor de umidade. Os valores medidos para os 6 experimentos apresentaram concordância com os valores simulados para o modelo bidimensional, com o valor de R^2 variando entre 0,9978 e 0,9997 e os valores de $RMSE$ e $PBIAS$, sendo próximos de zero. Três novas equações de propriedades do milho vindas da literatura foram adicionadas ao modelo matemático em substituições as equações antigas. Ao realizar a validação utilizando os três parâmetros estatísticos descritos anteriormente, concluiu-se que essas equações podem ser utilizadas no modelo matemático. O modelo tridimensional também foi capaz de prever o comportamento da secagem e os valores foram próximos do modelo bidimensional. Por fim, foi realizada uma análise energética e exérgica dos 6 experimentos de secagem, onde o experimento, com temperatura de entrada igual a 40°C e velocidade igual a 0,8 m.s⁻¹, obteve a maior média de eficiência energética, sendo igual a 17,50% e o experimento com temperatura de entrada de 60°C e velocidade de 0,8 m.s⁻¹, obteve a maior média de eficiência exérgica, sendo igual a 2,47%.

Palavras-Chave: Secagem em leito fixo de grãos. Milho. Método dos Volumes Finitos. CFD. Análise Energética e Exérgica.

ABSTRACT

ENERGY AND EXERGETIC ANALYSIS OF CORN DRYING IN A CYLINDRICAL DRYER WITH VERTICAL AIR FLOW USING FINITE VOLUME METHOD

Grain drying is a thermal process for removing moisture from agricultural products in order to preserve quality. However, this process has a high energy expenditure, which varies from 10 to 25% of the national energy use each year. Therefore, studies related to drying are relevant in order to use energy resources more efficiently. Present work carried out the study a mathematical model for drying corn grains in a fixed bed. Mathematical model used was based on literature and the numerical results were solved using the Finite Volume Method with software ANSYS Fluent, and with tool User-Defined Function (UDF). The validation of the mathematical model considered 3 statistical parameters: the coefficient of determination (R^2), the root mean square error ($RMSE$) and the Bias percentage ($PBIAS$) and the variable used was the moisture content. The values measured for the 6 experiments showed excellent agreement with the values simulated for the two-dimensional model, with the value of R^2 varying between 0.9978 and 0.9997 and the values of $RMSE$ and $PBIAS$ being close to zero. Three new equations of corn properties from the literature were added to the mathematical model in substitutions of the old equations, when carrying out the validation using the three statistical parameters described above, it was concluded that these equations can be used in the mathematical model. The three-dimensional model was also able to predict the drying behavior, and the values were close to the two-dimensional model. Finally, an energetic and exergetic analysis of the drying experiments was carried out, where the experiment, with a temperature equal to 40°C and a velocity equal to 0.8 m.s⁻¹, obtained the highest average of energy efficiency, being equal to 17.50% and the experiment with inlet temperature of 60°C and velocity of 0.8 m.s⁻¹, the highest average of exergetic efficiency, being equal to 2.47%.

Keywords: Deep bed grain drying. Corn. Finite Volume Method. CFD. Energetic and Exergetic Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Secador experimental em leito fixo construído por Dias (2019)	52
Figura 2. Vista frontal da câmara de secagem de Dias (2019).....	52
Figura 3. Representação esquemática das condições iniciais e de contorno do ar e condição inicial milho dentro do secador	54
Figura 4. Volume elementar tridimensional.....	56
Figura 5. Geometria bidimensional da câmara de secagem do secador de Dias (2019)	62
Figura 6. Geometria tridimensional da câmara de secagem do secador de Dias (2019).....	62
Figura 7. Malha computacional bidimensional da câmara de secagem de Dias (2019).....	63
Figura 8. Malha computacional tridimensional da câmara de secagem de Dias (2019)	64
Figura 9. Comparação do teor de umidade experimental em base seca e numérico em função do tempo para os seis experimentos de secagem	72
Figura 10. Confrontação dos resultados numéricos com os dados experimentais da literatura .	76
Figura 11. Comparação entre as médias da eficiência energética dos resultados numéricos e dos dados experimentais	79
Figura 12. Eficiência energética dos experimentos ao longo do tempo de secagem	80
Figura 13. Variação do teor de umidade ao longo do secador para os experimentos 3 e 4 – Tempo: 7200s (final da secagem)	82
Figura 14. Variação da umidade relativa ao longo do secador para os experimentos 3 e 4 – Tempo: 7200s (final da secagem)	82
Figura 15. Eficiência exergética dos experimentos ao longo do tempo de secagem	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Condições iniciais e condições de contorno da equação da umidade absoluta do ar .	50
Tabela 2. Condições iniciais e condições de contorno da equação do teor de umidade do leito	51
Tabela 3. Condições iniciais e condições de contorno da equação da temperatura do ar	51
Tabela 4. Condições iniciais e condições de contorno da equação da temperatura do leito de grãos	51
Tabela 5. Dados experimentais das condições iniciais e de contorno do secador – DIAS, 2019	53
Tabela 6. Teste de malha utilizando o teor de umidade médio do experimento 1 de Dias (2019) para quatro diferentes malhas.....	65
Tabela 7. Valores de Energia Cinética Turbulenta (k) e a Dissipação da Energia Cinética Turbulenta (ε) para cada experimento.....	66
Tabela 8. Passo-a-Passo da Implementação do Modelo Matemático no software <i>Ansys Fluent</i>	67
Tabela 9. Parâmetros Estatísticos (R^2 , SQR e RMSE) do teor de umidade para cada experimento de secagem do trabalho de Dias (2019).....	73
Tabela 10. Parâmetros estatísticos para o modelo matemático com a primeira equação do calor latente de vaporização da água para o leito de grãos de milho (eq. 48).....	74
Tabela 11. Parâmetros estatísticos para o modelo matemático com a segunda equação do calor latente de vaporização da água para o leito de grãos de milho (eq. 49).....	74
Tabela 12. Parâmetros estatísticos para o modelo matemático com a equação do teor de umidade de equilíbrio para o milho (eq. 50)	74
Tabela 13. Parâmetros estatísticos do teor de umidade para cada experimento de secagem do trabalho de Dias (2019) para o modelo tridimensional	75
Tabela 14. Parâmetros estatísticos da eficiência energética para cada experimento de secagem do trabalho de Dias (2019).....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASAE	American Society of Agricultural Engineers
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CFD	Computational Fluid Dynamics
EDP	Equações Diferenciais Parciais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LSPA	Levantamento Sistemático da Produção Agrícola
MDF	Método de Diferenças Finitas
MVF	Método de Volumes Finitos
UDF	User-Defined Function
UDM	User-Defined Memory
UDS	User-Defined Scalar
VC	Volume de Controle

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Área superficial específica do leito de grãos [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$]
A	Coefficiente de linearização, coeficiente da equação de secagem [-]
B	Coefficiente de linearização, coeficiente da equação de secagem [-]
c	Calor específico [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
C_1, C_2 e C_3	Constantes empíricas fornecidas pelo <i>ANSYS Fluent</i> [-]
C_2	Fator de resistência inercial [m^{-1}]
D_{eff}	Coefficiente efetivo de difusão de umidade para o leito de grãos [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
e	Porosidade do leito de grãos [-]
E	Entalpia [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
EA	Erro absoluto [-]
$ER_{\%}$	Erro relativo percentual [%]
E_e	Energia teórica que entra no sistema de secagem [kJ]
E_T	Energia que entra no sistema de secagem [kJ]
E_V	Energia demandada para evaporar a umidade contida nos grãos [kJ]
\dot{E}_x	Taxa de exergia [W]
\vec{g}	Vetor aceleração da gravidade [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
G_k	Geração de energia cinética turbulenta [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$]
G_b	Geração de energia cinética devido a flutuação [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$]
h	Coefficiente convectivo de transferência de calor [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]
h_{amb}	Entalpia do ar na condição de entrada [kJ];
h_e	Entalpia do ar na condição de entrada [kJ];
h_{fg}	Calor latente de vaporização da água [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
I	Tensor unitário [-]
I	Intensidade de turbulência [-]
k	Condutividade térmica [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
k	Energia cinética turbulenta [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$]
m	Massa [kg]
M	Teor de umidade do leito de grãos [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto seco}}^{-1}$]
M_e	Teor de umidade de equilíbrio do leito de grãos [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto seco}}^{-1}$]
n	Número de total de volumes de controle do leito de grãos [-]
P	Pressão [Pa]
P_{atm}	Pressão atmosférica [Pa]
P_{vs}	Pressão de vapor de saturação [Pa]

$PBIAS$	Percentual BIAS [%]
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^2	Coefficiente de determinação [-]
R_a	Constante universal dos gases específica para o ar [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]
Re	Número de Reynolds [-]
RH	Umidade relativa do ar de secagem [-]
$RMSE$	Raiz do erro quadrático médio [-]
S	Constante específica para o grão de milho [$\text{Pa}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-3}$]
$S_{h,a}$	Termo fonte da equação de energia para o ar [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$]
$S_{h,g}$	Termo fonte da equação de energia para o leito de grãos [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$]
S_k	Termo fonte da equação de energia cinética turbulenta [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{m}^{-1}$]
S_m	Termo fonte da equação de quantidade de movimento para o ar [$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$]
S_w	Termo fonte da equação de balanço de umidade para o ar [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$]
S_ε	Termo fonte da dissipação de energia cinética turbulenta [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-4}\cdot\text{m}^{-1}$]
t	Tempo [s]
T	Temperatura absoluta do ar de secagem [K]
V	Volume total do leito de grãos [m^3]
v	Velocidade [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
\vec{v}	Vetor velocidade [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
w	Umidade absoluta do ar, bulbo seco [$\text{kg}_{\text{água}}\cdot\text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$]
Y_M	Dissipação da dilatação em escoamentos compressíveis [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{m}^{-1}$]

Letras gregas

α	Permeabilidade do leito de grãos [m^2]
ε	Dissipação de energia cinética turbulenta [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$]
η_e	Eficiência energética [-]
η_{ex}	Eficiência exergética [-]
θ	Temperatura absoluta do leito de grãos [K]
μ	Viscosidade [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
μ_t	Viscosidade turbulenta [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$]
ρ	Massa específica [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
σ_k	Número de Prandtl para k [-]
σ_ε	Número de Prandtl para ε [-]
$\bar{\tau}$	Tensor de tensões de Reynolds [Pa]

ϕ	Variável de interesse [-]
ψ	Exergia específica do escoamento total do ar [J/kg]

Subscritos e sobrescritos

0	Valores iniciais (ambiente)
00	Estado Morto
<i>a</i>	Ar
<i>ant</i>	Anterior
<i>b</i>	Leito de grãos
<i>bs</i>	Base seca
<i>bu</i>	Base úmida
<i>eva</i>	Evaporada
<i>exp</i>	Valor experimental
<i>g</i>	Grão de milho
<i>i</i>	Instantânea
<i>in</i>	Entrada
<i>num</i>	Valor da simulação numérica do presente trabalho
<i>v</i>	Vapor de água
<i>w</i>	Água

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. JUSTIFICATIVA	17
1.2. OBJETIVOS	18
2. DESENVOLVIMENTO	20
2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1.1. Modelos Matemáticos de Secagem	21
2.1.2. Fluidodinâmica Computacional (CFD) na Secagem	25
2.1.3. Análise Energética e Exergética de Secadores	28
2.2. MODELO MATEMÁTICO	31
2.2.1. Considerações do Modelo Matemático	32
2.2.2. Equações para o ar	32
2.2.2.1. Conservação de massa	33
2.2.2.2. Quantidade de movimento	33
2.2.2.3. Balanço de umidade	35
2.2.2.4. Conservação de energia	36
2.2.2.5. Equações de propriedades	38
2.2.3. Equações para o leito de grãos	39
2.2.3.1. Equação empírica de secagem em camada fina	39
2.2.3.2. Conservação de energia	40
2.2.3.3. Equações de propriedades	41
2.2.4. Modelo de Turbulência	42
2.2.5. Análise Energética e Exergética da Secagem	44
2.2.6. Equações recentes da literatura	48
2.2.6.1. Calor latente de vaporização da água para o leito de grãos de milho ..	48
2.2.6.2. Teor de umidade de equilíbrio para o milho	49
2.2.7. Resumo das Equações	50
2.3. DESCRIÇÃO DO SECADOR E DADOS EXPERIMENTAIS	51
2.4. PROCEDIMENTO NUMÉRICO	54
2.4.1. Método dos Volumes Finitos	54
2.4.2. <i>User-Defined Function</i> (UDF)	59
2.4.3. Aplicação do modelo matemático no <i>ANSYS Fluent</i>	60
2.4.3.1. Construção da geometria do secador	61
2.4.3.2. Elaboração da malha	63
2.4.3.3. Teste de malha	64
2.4.3.4. Implementação das equações no <i>ANSYS Fluent</i>	66

2.5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
2.5.1.	Validação do Modelo Matemático	69
2.5.1.1.	Confrontação dos dados experimentais de teor de umidade médio de Dias (2019) com os resultados numéricos – Geometria Bidimensional	71
2.5.1.2.	Confrontação dos resultados do teor de umidade obtidas experimentalmente por Dias (2019) com os resultados numéricos obtidos utilizando as equações recentes da literatura – Geometria Bidimensional	73
2.5.1.3.	Confrontação dos dados experimentais de teor de umidade médio de Dias (2019) com os resultados numéricos – Geometria Tridimensional	75
2.5.2.	Análise Energética.....	76
2.5.3.	Análise Exergética	83
3.	CONCLUSÃO	86
4.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	APÊNDICE A – MACROS UTILIZADAS NO PROGRAMA.....	93
	APÊNDICE B – RELATÓRIO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS PARA GEOMETRIA BIDIMENSIONAL DOS EXPERIMENTOS DE SECAGEM.....	95

1. INTRODUÇÃO

A secagem é um processo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, sendo o objetivo a retirada da umidade do produto. Este processo traz transformações físicas ou químicas ao produto e pode ocasionar mudanças na qualidade do produto (CHAVAN *et al.*, 2020).

Na agricultura, a secagem é uma das etapas do processo de tratamento de grãos para proporcionar condições de consumo humano e animal. O intuito deste processo é para que os grãos não sofram contaminações de microrganismos e insetos, a preservação da sua aparência e das suas qualidades nutritivas, prolongando assim seu tempo de vida. Sendo assim, os estudos referentes à secagem são de grande valia para diversos setores da indústria.

Os sistemas de secagem são classificados como: Natural e Artificial, e esses são diferenciados pela maneira de utilização do ar. Na secagem natural, o produto é exposto ao sol e em um local relativamente seco, ocorrendo assim a perda de umidade para o ambiente. Já na secagem artificial, o produto é submetido a uma movimentação forçada de ar quente, proveniente de uma fonte térmica de calor, promovendo a evaporação de água contida no produto, permitindo uma rápida redução do teor de umidade do produto escolhido em comparação com o processo natural (DIAS, 2019).

A secagem artificial pode ser classificada de acordo com o fluxo de ar e de grãos dentro do secador. As principais categorias são:

- a) Secagem em Leito Fixo: O ar de secagem atravessa um leito fixo de grãos dentro do secador;
- b) Secador Concorrente: O ar e o grão possuem os seus fluxos caminhando no mesmo sentido paralelamente;
- c) Secador Contracorrente: Os fluxos de ar e de grãos estão paralelos, porém possuem fluxos em sentidos opostos;
- d) Secador a Corrente Cruzada: O fluxo de grãos está em sentido perpendicular em relação ao fluxo de ar;
- e) Secador Misto: Onde os fluxos de grãos e de ar podem apresentar escoamentos cruzado, contracorrente e concorrente.

A secagem em camada estacionária (leito fixo) ocorre quando um fluxo de ar forçado atravessa uma camada de produtos que permanece estática no interior do secador e o ar

atravessa o leito, transferindo calor para o produto conseqüentemente retirando a água (SILVA, 2015).

Dessa maneira, a secagem ocorre em camadas, com a formação de zonas de secagem. A primeira zona, está localizada na entrada de ar, é onde os grãos estão em equilíbrio higroscópico com o ar de secagem, conseqüentemente estando esses grãos secos e, além disso estão a uma temperatura mais elevada. A segunda zona, mais conhecida como frente de secagem, é onde a transferência de água para o ar ocorre de maneira mais efetiva. Na terceira e última zona, os grãos se encontram úmidos e com baixas temperaturas, já que ao longo do secador o ar de secagem tem a tendência de perder sua capacidade de transferir calor aos grãos, dificultando a retirada de umidade dos grãos.

A secagem é um dos processos mais antigos utilizados para a conservação de diversos alimentos. Arroz, soja e milho são exemplos de alimentos, que necessitam de passar pelo processo de secagem, para que estejam aptos para o consumo. Dentre os grãos citados, o milho se destaca mundialmente devido a sua versatilidade, sendo próprio tanto para alimentação humana quanto para alimentação animal, além de aplicações na indústria e também podendo ser convertido em combustível.

De acordo com o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) apontam que a produção de milho representa 40% da produção agrícola de cereais do Brasil em 2020 (IBGE, 2020), perdendo apenas para a Soja que representa 48%. Com isso, pode-se afirmar que o milho é um dos mais importantes alimentos para segurança alimentícia do Brasil.

Segundo o Relatório da Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO, 2020), mostra que o Brasil é o segundo maior exportador de milho a nível mundial, perdendo apenas para os Estados Unidos. Para a Safra 2020/2021, o Brasil exportou 39 milhões de toneladas, enquanto os EUA exportaram 59,1 milhões de toneladas de milho. Em relação a produção de milho, o Brasil ocupa o terceiro lugar produzindo 110 milhões de toneladas, perdendo apenas para EUA com 374 milhões de toneladas e China com 260 milhões de toneladas. Já em relação ao consumo de milho, o Brasil ocupa a quarta posição com 70 milhões de toneladas, sendo o primeiro lugar dos EUA com 311 milhões, o segundo da China com 279 milhões e o terceiro da União Europeia com 88 milhões.

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a secagem de milho de maneira natural gira em torno de 70%-80% da produção, enquanto a secagem artificial

está em torno de 20%-30%. Devido aos custos da secagem artificial, a secagem natural se torna uma solução economicamente viável aos pequenos produtores. Entretanto, a secagem natural prejudica a qualidade do milho pela exposição a variações climáticas e aos ataques de insetos, pragas e fungos (EMBRAPA, 2015).

Com isso, pode-se concluir que a secagem artificial é uma técnica vital para produções de média e grande porte. E a redução do seu custo, tornaria sua utilização mais difundida. Para a redução do seu custo é importante o investimento em eficiência energética para que se possa aproveitar o melhor uso da energia.

1.1. JUSTIFICATIVA

A secagem artificial é uma operação que demanda um elevado consumo de energia elétrica e de combustível, uma vez que se precisa de aquecimento e movimentação de grandes volumes de ar (DIAS, 2019). Além disso, a demanda de energia para o processo de secagem, aumenta a cada ano com o aumento da produção, o que obriga a busca por soluções tecnológicas que otimizem esse processo (DELGADO-PLAZA, 2020). Estima-se que as operações de secagem consomem cerca de 10-25% do uso nacional de energia a cada ano, considerando o efeito ambiental e a quantidade limitada de recursos naturais para a produção de energia, é vital explorar tecnologias novas referentes aos processos de secagem (LI, 2020). Além disso, o processo de secagem possui um elevado consumo energético e os secadores possuem baixas eficiências térmicas, estando na faixa de 25-50% (ERBAY e HEPBASLI, 2013). Logo, é imprescindível o estudo da análise energética e exergética da secagem para melhorar a eficiência da secagem.

Castro (2018) afirma que a análise da eficiência energética é importante, pois permite identificar as perdas de calor no processo de secagem. Porém, a partir da análise exergética que é possível identificar economias potenciais levando em consideração as condições operacionais. De acordo com Li (2020), a análise exergética é um método eficaz para identificar métodos e possíveis benefícios para projetar sistemas térmicos eficientes através da redução das ineficiências existentes. Portanto, as análises energética e exergética foram alvos de estudo desse presente trabalho devido a sua importância.

Com o avanço da tecnologia, no que se refere a computadores de maior performance, as simulações numéricas têm ganhado uma maior importância, uma vez que permitem respostas mais rápidas para tomadas de decisões no âmbito do processo industrial. Nesse avanço

tecnológico, o contínuo melhoramento dos softwares de simulação tem permitido o estudo de modelos mais aprofundados, trazendo o mais próximo do comportamento real.

A modelagem matemática permite prever os fenômenos de transferência de calor e massa do processo secagem e, a partir da implementação numérica do processo de secagem mediante uso de um software de CFD, são obtidos os resultados numéricos, que por sua vez são confrontados com estudos experimentais para validação do modelo numérico mediante uso de parâmetros estatísticos. Entretanto, diversos problemas são encontrados para modelagem matemática, dentre eles podem ser citados: falta de informações das condições de contorno do problema de secagem a ser estudado, ausência de informações das propriedades dos produtos a serem secados e falta de informações de como as medições foram realizadas em campo.

Portanto, é importante a utilização de dados experimentais de secagem recentes e que contenham uma descrição detalhada do projeto realizado para que o processo, dentro do software, seja replicado de forma fidedigna. Este presente trabalho utilizou os dados experimentais de Dias (2019), que é um trabalho experimental de secagem recente, para aplicar o modelo matemático elaborado por Tolentino (2018).

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi realizar um estudo numérico utilizando o modelo matemático de secagem de milho em leito fixo, implementado no ambiente do software ANSYS Fluent por Tolentino (2018), com base em modelos disponíveis na literatura. Os dados experimentais da literatura, que são provenientes da dissertação de mestrado de Dias (2019), foram confrontados com os resultados numéricos obtidos.

Os objetivos específicos são:

- Resolver numericamente o modelo matemático de secagem em leito fixo de grãos de milho utilizando o Método dos Volumes Finitos;
- Validar o modelo numérico confrontando os resultados numéricos com os dados experimentais disponíveis na literatura;
- Inserir equações de propriedades mais recentes da literatura no modelo matemático estudado e avaliar os resultados numéricos confrontando com dados experimentais da literatura;

- Aplicar o modelo numérico para os secadores bidimensional e tridimensional e confrontar com os dados experimentais disponíveis na literatura;
- Realizar um estudo energético e exergético do secador, confrontando os resultados numéricos com os dados experimentais da literatura.

2. DESENVOLVIMENTO

Este capítulo é dividido em revisão bibliográfica, o modelo matemático, descrição do secador e dados experimentais, procedimento numérico e resultados. No tópico de revisão bibliográfica é apresentado uma série de artigos pertinentes ao tema estudado.

O tópico modelo matemático foi baseado em estudos disponíveis na literatura, sendo que o mesmo apresenta equações diferenciais parciais obtidas de leis de conservação aplicadas a secagem em leito fixo de grãos. Esse modelo também possui equações para determinação das propriedades do produto a ser secado. O tópico descrição do secador e dados experimentais apresenta as informações pertinentes dos dados do secador utilizados para a confrontação com os resultados encontrados no trabalho. No tópico procedimento numérico é detalhado que solução é obtida por meio do Método dos Volumes Finitos (MVF) com o auxílio do software ANSYS Fluent, onde foram utilizados: modelo matemático de não-equilíbrio para meios porosos que é disponível no software e a função User-Defined Function (UDF).

Por fim, no tópico resultados, os seguintes parâmetros estatísticos foram utilizados para confrontar os dados experimentais com os resultados numéricos: o coeficiente de determinação, raiz do erro quadrático médio e percentual BIAS, onde a variável escolhida foi o teor de umidade médio. Esses parâmetros foram aplicados tanto para o modelo bidimensional quanto para o modelo tridimensional. Também foi realizada uma confrontação dos resultados numéricos com os dados experimentais da eficiência energética. Por fim, foi calculado os valores da eficiência energética e exergética a fim de estudar o comportamento desses parâmetros.

2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este tópico traz uma revisão bibliográfica dividida em três partes, onde a primeira parte é referente a trabalhos que utilizaram modelos matemáticos para prever o comportamento da secagem de grãos. A segunda parte é sobre os estudos da aplicação da fluidodinâmica computacional para o processo de secagem. A Fluidodinâmica Computacional (CFD) é uma ferramenta para resolução das Equações Diferenciais Parciais (EDP's) de conservação da massa, quantidade de movimento linear e da energia nos problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor e massa, dentre outros fenômenos relacionados (NORTON e SUN, 2006). A terceira e última apresenta trabalhos que realizaram análise energética e exergética do processo de secagem.

2.1.1. Modelos Matemáticos de Secagem

A secagem é um dos processos mais antigos existentes na humanidade, e apesar de todos os avanços alcançados até hoje, os pesquisadores ainda estão em busca de um aprofundamento com ênfase detalhada em fundamentos e abordagens inovadores para solucionar os gargalos da secagem industrial e para aprimorar as técnicas utilizadas (RAMACHANDRAN, 2018).

O comportamento do produto durante a secagem ocorre de maneira diferente, de acordo com a espessura da camada dos grãos. Este comportamento pode ser analisado por dois modelos: camada fina e camada espessa (BROOKER *et al.*, 1974; PARRY, 1985; PARTI, 1993).

No processo de secagem em camada fina, o ar escoar por um material úmido e as variáveis (temperatura, vazão mássica e teores de umidade) em todo o volume do leito permanecem iguais ao decorrer do tempo. Com isso, pode-se considerar que a camada de grãos em análise se comporta como um grão individual.

A camada espessa (ou leito profundo) considera simultaneamente as variáveis temporal e espacial. Podendo ser o modelo unidimensional, bidimensional e tridimensional, sendo que os parâmetros (temperatura e o teor de umidade do grão) variam de acordo com a posição espacial do grão no leito (BORTOLAIA, 2011).

Um programa computacional foi desenvolvido com a capacidade de resolução dos modelos de secagem em camadas estacionárias, utilizando o modelo de Brooker *et al.* (1974), que foi baseado nos balanços de energia e de massa, em volume diferencial da massa de grãos. Os resultados numéricos foram confrontados com dados experimentais em nove condições de temperatura e teor de umidade de um leito fixo de grãos de milho, onde o maior erro relativo do teor médio de umidade foi de 5,4% (MARTINS *et al.*, 1982).

Laws e Parry (1983) apresentaram um modelo geral para os 4 tipos de secadores de grãos – leito fixo, fluxo paralelo, fluxo cruzado e contrafluxo – utilizando EDP's. Por fim discutiram algumas das diferenças entre os modelos obtidos com os de outros trabalhos.

A simulação da secagem de milho em leito fixo e em camada espessa foi estudada por Souza (1996) que utilizou o modelo desenvolvido por França *et al.* (1994), onde foi utilizada a técnica dos elementos finitos para a resolução das equações diferenciais para secadores uni e bidimensionais e axissimétrico. Além disso, o trabalho propôs utilizar diferentes técnicas numéricas: Runge Kutta de quarta ordem, diferenças finitas ou elementos finitos, para a solução das equações diferenciais que possuem somente condições iniciais (equação do teor de umidade

e temperatura do leito de grãos), para a comparação entre as diferentes técnicas numéricas. Para o secador unidimensional, os melhores resultados foram obtidos com a técnica MDF (Método das Diferenças Finitas) para a solução da equação do teor de umidade e o método Runge Kutta para solução da equação da temperatura do leito de grãos. Os resultados desse modelo apresentaram um erro relativo, em relação aos dados experimentais, de no máximo de 5% para o início da secagem. Ao longo do tempo, as diferenças se tornaram desprezíveis. Para o secador bidimensional, os melhores resultados foram obtidos com a técnica das diferenças finitas para a solução das equações diferenciais do teor de umidade e temperatura do leito de grãos. Nesta simulação foi possível estudar o efeito do comportamento de algumas variáveis de secagem para o secador bidimensional, concluindo que maiores temperaturas e pressões de ar na entrada e menores umidades relativas do ar de entrada aumentam a capacidade de secagem, diminuindo o tempo. O secador axissimétrico foi comparado com dados experimentais de um secador real utilizado na indústria, e o método das diferenças finitas foi o que apresentou melhores resultados com os dados de ensaio, para o teor de umidade.

Zare *et al.* (2006) confrontou resultados numéricos com dados experimentais obtidos de um secador de grãos, em escala laboratorial, construído pelos autores. Os resultados numéricos de teor de umidade médio do leito de grãos em função do tempo para diferentes alturas apresentaram um desvio padrão menor que 9% em relação aos dados experimentais.

Um modelo de simulação de secagem do arroz foi desenvolvido para prever os perfis de teor de umidade e temperatura dos grãos, e temperatura e umidade do ar, durante o processo de secagem. A validação do modelo matemático foi obtida a partir da realização de experimentos de secagem em secador em escala laboratorial. Os experimentos ocorreram com as temperaturas de 45 e 50°C para os fluxos mássicos de 0,1, 0,16, 0,22 kg m⁻² s⁻¹. Com a validação realizada, foi proposto uma otimização no secador a fim de minimizar o consumo específico de energia, onde as condições ideais pro processo de secagem encontradas foram: fluxo mássica de 0,03 kg m⁻² s⁻¹ e temperatura do ar de 35°C (ZARE e CHEN, 2009).

Diamante *et al.* (2010) apresentaram um estudo para ajustar um novo modelo matemático para as curvas de secagem em camada fina, para dois tipos de kiwis e dois tipos de damascos. O novo modelo foi comparado estatisticamente com três outros modelos de secagem (Henderson e Pabis, Page e o modelo logarítmico), disponíveis na literatura. Os autores utilizaram o teste qui-quadrado (χ^2), o erro quadrático médio (*RMSE*) e o erro relativo médio (*P*) para elaborar a análise estatística. Para os tipos de kiwis estudados, o χ^2 variou entre 0,000067 e 0,0000681, o *RMSE* variou ente 0,001256 e 0,004424 e *P* variou entre 5,35% e

37,23%. Para os dois tipos de damasco, o χ^2 variou entre 0,000011 e 0,0000128, o *RMSE* variou entre 0,003206 e 0,011250 e *P* variou entre 2,03% e 5,91%. A partir dos resultados, os autores concluíram que a equação proposta pode ser utilizada para descrever a secagem de frutos em camada fina.

Bortolaia (2011) desenvolveu um modelo matemático e um programa computacional para simulação do processo de secagem de soja em secadores do tipo torre de coluna com fluxo contínuo e múltiplos estágios, onde o modelo matemático apresenta um sistema com quatro equações diferenciais parciais não-lineares. Para obtenção dos dados experimentais, para a dinâmica de secagem de soja em camada fina, o autor estabeleceu o campo de abrangência para os seguintes parâmetros: temperatura do ar de secagem (45°C a 110°C), velocidade do ar de secagem (0, que significa convecção natural, a 2,5 m s⁻¹), umidade relativa do ar de secagem (10% a 30%) e teor de umidade inicial dos grãos (13% a 32%). Identificou-se que a transferência de massa na superfície de contato entre o grão e o ar é o fator dominante no tempo inicial de secagem, logo o aumento da velocidade do ar acelera o processo de secagem. Porém, essa influência se reduz à medida que o teor de umidade do grão se reduz durante o fenômeno da secagem.

A comparação entre os dados dos experimentos e as simulações numéricas apresentam concordância satisfatória, indicando diferenças relativas médias inferiores a 7%. Foi possível também determinar a eficiência energética de cada esquema proposto pelo trabalho, o reaproveitamento do calor do ar de recirculação ocasionou em uma economia média de combustível de 28,5% a 41%, e uma eficiência de secagem entre 39,7% a 68%, dependendo do esquema analisado.

Kucuk (2014) realizou uma revisão bibliográfica na qual curvas de secagem de grãos foram obtidas para o modelo em camada fina. O autor evidenciou que a maioria dos modelos teóricos de secagem em camada fina utilizados são derivados da segunda lei de Fick e que o modelo mais simples é o de Newton, onde a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de umidade instantâneo do material e seu valor de equilíbrio.

Liu *et al.* (2015) construíram um modelo de secagem em camada espessa combinando com o potencial hídrico da água. A validação ocorreu por meio da comparação com os dados experimentais, onde o erro relativo médio encontrado foi 2,98%, 2,97% e 2,73% para as temperaturas de 45°C, 55°C e 65°C, respectivamente.

A construção de um modelo matemático proposto por Golmohammadi *et al.* (2015) permitiu o entendimento sobre a distribuição de umidade dentro de um grão para as fases de secagem e para a fase de repouso. Os efeitos da temperatura e velocidade do ar foram investigados experimentalmente através de um secador de leito fluidizado em escala laboratorial. O modelo desenvolvido teve como objetivo a otimização para minimizar o consumo de energia, e é mostrado que o emprego de etapas de repouso, que é quando a secagem é temporariamente interrompida, e em seguida, reiniciada aumentando a taxa de secagem, reduz o consumo de energia.

EP *et al.* (2016) apresentam um artigo de revisão de camada espessa e de camada fina, além de outras teorias fundamentais que regem o processo de secagem. O autor constatou que vários pesquisadores utilizaram dois modelos exponenciais de múltiplos termos para descrever a secagem em camada fina, para diferentes produtos alimentícios. Os autores também constataram que a principal característica dos modelos de camada fina é que eles levam em consideração as mudanças no teor de umidade que ocorrem durante a secagem. E, dentre os modelos analisados pelos autores, nenhum modelo de difusão foi testado para descrever o comportamento de secagem em camada espessa.

Sanghi *et al.* (2018) desenvolveram um modelo em CFD para a simular a secagem de milho em um secador solar. O desempenho do secador foi simulado em condições temporais diferentes, usando como condição o dia claro e a outra condição o dia nublado. O modelo permitiu a visualização dos perfis de temperatura, umidade e velocidade do ar no secador. A validação com os dados experimentais ocorreu utilizando o erro quadrático médio (*RMSE*) e o percentual BIAS (*PBIAS*), que fornece uma indicação sobre se o modelo subestima (*PBIAS* positivo) ou superestima (*PBIAS* negativo) as quantidades, sendo o valor ótimo igual a zero. Para a temperatura o valor de *RMSE* variou entre 3 e 8 e o *PBIAS* variou de -6 a -10 e, para o teor de umidade, o valor de *RMSE* variou entre 0,005483 e 0,009729 e o *PBIAS* variou de -15.4513 a -27.1525, o que representa que o modelo superestimou os valores de temperatura e o teor de umidade.

Çelik (2020) realizou um estudo sobre a secagem de grãos a nível industrial e, para isso, os autores criaram um protótipo de teste em escala laboratorial para determinar o modelo numérico mais adequado a ser usado no sistema de controle. O secador experimental em leito fixo, construído pelos autores, permite que os gases de exaustão quentes entrem pela câmara de secagem horizontalmente, assim como ocorre em secadores de torres industriais. A temperatura do ar de secagem foi mantida constante a 103°C e os valores de velocidade do ar variaram entre

2,8 m s⁻¹ e 3,5 m s⁻¹. Os resultados mostraram que a velocidade do ar foi um fator significativo na secagem do milho. Os dados experimentais foram modelados com um método de ajuste de curva usando o software MATLAB, e dos diversos modelos utilizados. O mais adequado para descrever o comportamento de secagem do milho foi onde Midilli. A validação ocorreu a partir do coeficiente de determinação (R^2), a soma dos quadrados dos resíduos (SSE) e a raiz do erro quadrático médio ($RMSE$) e para o modelo de Midilli os resultados foram 0,9929 para o R^2 , 0,00338 para o SSE e 0,00102 para a $RMSE$.

Ivanova *et al.* (2020) apresentaram um estudo experimental para a secagem em camada fina do cogumelo conhecido como Champignon (*Agaricus Bisporus*). Os experimentos foram realizados em temperaturas do ar de 35°C, 45°C e 55°C e velocidade do ar constante de 2m.s⁻¹. Os autores selecionaram 11 modelos matemáticos que foram ajustados aos dados experimentais e utilizaram o coeficiente de determinação (R^2), o teste qui-quadrado (χ^2) e o erro quadrático médio ($RMSE$) para identificar qual o modelo mais se aproxima das curvas de secagem do Champignon. O modelo modificado de Henderson e Pabis teve maior de R^2 (0,9990) e menores valores de χ^2 (0,0001) e $RMSE$ (0,0092).

Salvatierra-Rojas *et al.* (2021) elaboraram um secador solar inflável para evitar as perdas pós-colheita na produção de arroz, que podem chegar a cerca de 36% apenas no processo de secagem. O comportamento do fluxo de ar foi simulado utilizando a fluidodinâmica computacional via software *ANSYS Fluent*. Os autores também desenvolveram um modelo térmico em Simulink no software *MATLAB* levando em consideração a transferência de calor na área de aquecimento e transferência de calor e massa na área de secagem. Além disso utilizaram o modelo em Simulink para prever o desempenho da secagem sob várias condições climáticas durante 10 anos. As temperaturas e os teores de umidade simulados mostraram boa adequação (erro percentual absoluto médio ($MAPE$) < 10%) com os dados experimentais.

2.1.2. Fluidodinâmica Computacional (CFD) na Secagem

Thorpe (2008) reiterou a utilização do CFD no desenvolvimento de modelos matemáticos da secagem de grãos mais robustos e flexíveis para a resolução dos problemas que envolvem esse fenômeno. Ainda no trabalho, o autor apresentou o modelo de secagem do trigo, onde demonstrou os resultados graficamente por um software comercial CFD.

O CFD é capaz de trazer melhorias aos equipamentos usados na secagem com menos custo e esforço que os experimentos em laboratórios. Estudos recentes demonstraram que o

CFD é capaz de simular os processos ocorridos nos secadores industriais. Porém, os autores ressaltam que não se deve depender totalmente do CFD para tirar conclusões, uma vez que os processos ocorridos na secagem são de natureza complexa (JAMALEDDINE E RAY, 2010). Concluíram que a utilização do CFD permite encontrar a configuração ideal para o secador do leito fixo (PRUKWARUN *et al.*, 2013).

Elgamal *et al.* (2017) realizaram um estudo experimental para examinar o potencial da técnica de imagem térmica para validar modelos de simulação em CFD, desenvolvidos para descrever o processo de secagem de arroz em leito profundo. A secagem do arroz ocorreu em um secador convectivo, e durante o processo, foram produzidas imagens térmicas do arroz dentro da câmara de secagem, para comparar com as imagens produzidas pelo software. O modelo CFD desenvolvido, para prever o teor de umidade, exibiu uma boa correlação em relação com os dados experimentais com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,96. O modelo também foi capaz de prever a temperatura do arroz no secador com coeficiente de determinação maior que 0,90.

A ferramenta CFD foi utilizada para investigar os efeitos da aplicação da energia infravermelho em conjunto com a secagem em leito fluidizado, para reduzir o teor de umidade do milho. Os resultados foram que houve uma economia de 45 a 87% no tempo de secagem e 36-86% em economia em consumo de energia (NEJADI e NIKBAKHT, 2017).

Malekjani e Jafari (2018) trazem uma revisão da simulação da secagem em alimentos feita por CFD. Os estudos evidenciaram que as simulações numéricas tem contribuído para o desenvolvimento de novos secadores, modificações para os sistemas atuais, economia de energia, otimização dos processos e principalmente a preservação da qualidade do alimento.

A secagem solar de rodela de cenoura em secadores solares em escala laboratorial por convecção natural direta e indireta e também pelo modo solar misto foi estudada por Mahapatra (2018). O autor desenvolveu um modelo numérico em 2D de elementos finitos para analisar a distribuição de temperatura dentro das fatias de cenoura, durante o período da secagem utilizando o software COMSOL Multiphysics. Os resultados numéricos foram confrontados com dados experimentais para a validação do modelo numérico. Foram utilizados métodos estatísticos, como o erro médio absoluto (*MAE*) e a raiz do erro quadrático médio (*RMSE*) na temperatura da amostra. O *MAE* e a *RMSE* encontrados foram 0,344, 0,453, 0,311, 0,368 e 0,384, 0,493 para o secador solar de modo direto, indireto e misto, respectivamente. A partir

dos resultados dos erros obtidos, foi possível constatar que com o modelo numérico proposto pode prever o perfil de temperatura da amostra durante o processo de secagem.

Chilka e Ranade (2018) realizaram experimentos de um único grão de amêndoa, em diferentes temperaturas, a fim de estimar os parâmetros de cinética de secagem e difusividade efetiva. Além disso, criaram um modelo tridimensional em CFD para a simular o padrão de fluxo de ar e a transferência de calor e massa na secagem. Ao comparar os dados experimentais com os dados numéricos, a faixa de erro estava entre 5 a 10%, confirmando que o modelo utilizado foi capaz de prever o comportamento da secagem da amêndoa.

O efeito da composição e da estrutura física do grão de milho na distribuição e no processo de transferência de umidade para o ar, para se obter os parâmetros ideais de secagem de milho, foi alvo do estudo de Zhao *et al.* (2018). Os autores desenvolveram um modelo numérico do comportamento físico do grão de milho constituído por quatro componentes diferentes: casca, endosperma córneo, farináceo endosperma e embrião. O modelo foi estabelecido com base em diferentes coeficientes de difusão e mesma condutividade para os quatro componentes. O software *COMSOL Multiphysics* foi utilizado para a simulação do processo de transferência de calor e massa no interior do grão de milho durante o processo de secagem em camada fina.

Zhao *et al.* (2019) utilizaram o software *COMSOL Multiphysics* para desenvolver um modelo numérico do processo de secagem do arroz. Os resultados numéricos foram confrontados com os dados experimentais, de modo que o desvio relativo máximo obtido foi de 8% (ZHAO *et al.*, 2019).

Jin *et al.* (2020) realizaram um estudo numérico do processo de difusão de umidade e a resistência da transferência de massa para o processo de secagem de milho. Os autores analisaram os efeitos da temperatura de secagem do ar, umidade relativa e velocidade do ar no processo de transferência de massa. Em comparação com os dados experimentais, o erro encontrado em relação aos resultados numéricos do modelo proposto foi de $\pm 5\%$.

O modelo tridimensional de turbulência k- ϵ foi construído em CFD, com o auxílio das User-Defined Functions (UDF), para realizar a verificação experimental de partículas de xisto betuminoso secando em leito fluidizado. Os resultados numéricos do teor de umidade foram confrontados com os dados experimentais, apresentando um desvio máximo de 13,75%, que de acordo com o autor satisfaz a faixa permitida de cálculo na engenharia (DONG *et al.*, 2020).

2.1.3. Análise Energética e Exergética de Secadores

Uma das principais questões tecnológicas atuais na área da secagem é reduzir o custo de fontes de energia para aumentar a eficiência dos secadores, sem que prejudique a boa qualidade dos produtos da secagem. Para uma correta análise da eficiência das instalações de secagem, é necessário tanto uma análise energética quanto uma análise exergética dessas instalações. A análise energética é baseada no princípio da conservação de energia, porém ela não apresenta informações sobre a irreversibilidade dos processos termodinâmicos. A análise exergética, dentro dos sistemas de secagem, tem como objetivo quantificar as fontes de ineficiência para distinguir a qualidade do consumo de energia, sendo possível selecionar as condições de secagem ideais para conseqüentemente reduzir o impacto ambiental dos secadores e afins (AGHBASHLO, 2013).

Syahrul *et al.* (2003) realizaram uma análise termodinâmica do processo de secagem em leito fluidizado de grandes partículas. Os produtos utilizados na secagem foram trigo e milho. A temperatura do ar de entrada tem um forte efeito na eficiência termodinâmica para o trigo, uma vez que o coeficiente de difusão do trigo é dependente apenas da temperatura. Entretanto para o milho, onde o coeficiente de difusão é dependente da temperatura e do teor de umidade das partículas, esse aumento na temperatura do ar de secagem não resultou em uma variação da eficiência energética. Foi detectado que, para o trigo, as eficiências aumentaram para uma redução de cerca de 15% na velocidade do ar. No entanto para o milho não teve diferença ao final do processo de secagem. Além disso, as eficiências energética e exergética apresentaram valores mais elevados para partículas com alto teor de umidade inicial.

Uma análise termodinâmica da secagem de milho em leito fixo e camada espessa apresentando modelos transitórios foi abordado por Amantéa *et al.* (2013) em seu estudo. A metodologia se baseia no controle de parâmetros operacionais, como por exemplo: velocidade e temperatura do ar de secagem e teor de umidade inicial do produto, para que se possa identificar as influências desses parâmetros nas eficiências energética e exergética. Foi identificado que as maiores eficiências energéticas foram obtidas com maiores teores de umidade inicial dos produtos, menores velocidades do ar e menores temperaturas do ar de secagem. As maiores eficiências exergéticas foram atingidas com maiores teores de umidade inicial dos produtos, menores velocidades do ar e maiores temperaturas do ar de secagem.

Ranjbaran *et al.* (2014) simularam com o auxílio do software *ANSYS Fluent*, o comportamento da secagem de arroz em um secador de leito profundo, onde os resultados numéricos foram comparados com dados experimentais, sendo que os valores de desvio relativo

médio (*MRD*), erro padrão de previsão (*SEP*) e erro máximo de previsão (*MEP*) para a previsão do teor de umidade do grão, temperatura do ar e umidade absoluta são inferiores a 6, 10 e 9%; 0,33% (b.s.), 1,24°C e 0,06% (kg/kg de ar seco); e 2,25% (b.s.), 6,8°C e 0,37% (kg/kg de ar seco), respectivamente. Os autores analisaram as eficiências energética e exergética de um processo de secagem em leito fixo e em camada espessa de grãos de arroz, onde foi investigado a atuação da temperatura do ar de secagem e da taxa de fluxo de massa na eficiência do secador. Os resultados numéricos obtidos evidenciaram que as maiores eficiência exergéticas foram obtidas a partir de temperaturas do ar de secagem mais elevadas e menores taxas de vazão mássica.

Experimentos de secagem de arroz em leito profundo foram conduzidos em um secador convectivo em escala laboratorial. Os experimentos foram realizados em diferentes temperaturas de entrada de ar de secagem e taxas de fluxo com o intuito de se investigar a eficiência exergética e outros parâmetros. As eficiências exergéticas do processo de secagem e da câmara de secagem foram encontradas nos intervalos de 5,10-29,41% e 32,64-67,75%, respectivamente. Os autores constataram que a aplicação de maiores temperaturas do ar de secagem resultou em maiores eficiências exergéticas (BEIGI *et al.*, 2017).

Tolentino (2018) elaborou um modelo numérico bidimensional de secagem de grãos de milho em leito fixo e camada espessa, baseado em equações diferenciais parciais para validação de experimentos de secagem. O modelo foi resolvido através da técnica dos volumes finitos utilizando o software Ansys Fluent, além de implementar diversas equações do modelo matemático com uso da linguagem C++ dentro do ambiente do software. A validação foi feita a partir da comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais de Martins (1982). O erro percentual mínimo foi de 5,44% e o erro percentual máximo foi de 12,46%, se enquadrando no erro percentual obtido por outros autores.

A partir da validação do modelo numérico de Tolentino (2018), foi realizado um estudo energético e exergético para dois secadores diferentes (sendo um unidimensional e o outro bidimensional). O autor constatou que menores vazões mássicas de ar de secagem, decorrentes de menores velocidades ou pressões na entrada, produziram maiores eficiências energética e exergética. Para o modelo unidimensional, a maior velocidade foi de 2,00 m.s⁻¹ e resultou numa eficiência energética média de 11,07% e uma eficiência exergética de 4,41% e a menor velocidade que foi de 0,30 m.s⁻¹ resultou numa eficiência energética média de 37,44% e uma eficiência exergética de 28,87%. Para o modelo bidimensional, a maior pressão foi de 8000 Pa e resultou numa eficiência energética média de 42,25% e uma eficiência exergética de 14,65%

e a menor pressão que foi de 2000 Pa resultou numa eficiência energética média de 53,14% e uma eficiência exergética de 26,12%.

Um secador a nível experimental de leito fixo, com controle de velocidade e temperatura do ar de secagem, foi construído por Dias (2019), com base em recomendações encontradas na literatura, tendo como o objetivo de estudar a cinética da secagem do milho em camada espessa, além de analisar as eficiências energéticas e exergéticas do equipamento desenvolvido. Foram realizados 6 experimentos de secagem em camada espessa com leito cilíndrico de 130mm de diâmetro e 200mm de altura, utilizando as temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C, e as velocidades de 0,8 e 1,3 m s⁻¹ para o ar de entrada, sendo que cada experimento teve duração de 120 minutos.

Após a realização dos experimentos, o autor concluiu que dentre os parâmetros variados (temperatura do ar e velocidade do ar), apenas a temperatura gerou diferenças relevantes no ponto de vista da subtração da umidade média do leito de grãos, e quanto mais elevada a temperatura, mais umidade foi retirada dos grãos de milho. Em relação as eficiências, o experimento com a temperatura de 50°C e velocidade de 0,8 m.s⁻¹ apresentou maior eficiência energética real, cuja média foi de 8%. Já a maior eficiência exergética média foi de 0,69% no experimento com temperatura de 60°C e velocidade de 0,8 m.s⁻¹.

De acordo com o autor, os experimentos realizados, demonstraram que o secador proposto foi capaz de realizar testes de secagem condizentes com a literatura, além de possuir um potencial de utilização do equipamento para validação de modelo matemáticos.

Golpour *et al.* (2020) avaliaram energeticamente e exergeticamente a secagem convectiva de fatias de batata, onde conduziram experimentos para quatro temperaturas do ar (40, 50, 60 e 70°C) e três velocidades do ar (0,5, 1,0 e 1,5 m.s⁻¹) em um secador convectivo com circulação de ar aquecido. Os resultados indicaram que as perdas de exergia diminuíram ao longo do tempo de secagem, enquanto a eficiência exergética aumentou. A máxima eficiência exergética obtida foi de 85,85% a 70°C e 0,5 m s⁻¹, enquanto a eficiência exergética mínima foi de 57,07% a 40°C e 1,5 m s⁻¹.

Uma avaliação do fluxo de energia e exergia sob convecção natural e convecção forçada de um secador solar misto durante a secagem de fatias de abacaxi utilizando a primeira e segunda lei da termodinâmica foi proposta por Rani e Tripathy (2021). A análise energética demonstrou que cerca de 55 a 78% da entrada de energia solar constituiu de perdas térmicas na placa absorvedora. O autor também constatou que um aumento da taxa de fluxo de massa de ar resultou em um aumento no ganho de calor pelo ar e uma redução nas perdas térmicas do coletor

solar, apresentando uma melhoria na eficiência. As eficiências energética e exergética do coletor solar foram de 8,18% e 0,38% para convecção natural, que foi melhorado para 28,87% e 1,65% respectivamente. Em relação ao secador também foi observado que eficiência exergética do coletor solar e da câmara de secagem foi influenciada positivamente pelo aumento da velocidade do ar.

A secagem do quiabo em um secador solar indireto sob convecção forçada e sob convecção natural foi estudado a fim de se realizar uma análise energética e exergética e para se obter a avaliação de desempenho do secador. As eficiências médias do coletor solar de ar e da secagem sob convecção forçada foram 74,98% e 24,95%, e para convecção natural foram 61,49% e 20,13%, respectivamente. As análises energética e exergética demonstraram que o desempenho da convecção forçada foi melhor que a convecção natural. (MUGI E CHANDRAMOHAN, 2021).

Da Silva *et al.* (2021) projetaram um secador solar de cabine mista e testaram durante o equinócio da primavera, com objetivo de secar grãos de milho. Os grãos de milho foram secados até um teor de umidade de 13%, com a temperatura ambiente variando entre 23°C a 36°C e uma radiação solar máxima de 1060 W.m⁻² e uma radiação solar média de 710 W.m⁻², o tempo de secagem foi de 8,5h e a eficiência média foi de 6,1%. O módulo fotovoltaico agiu como pré-aquecedor do fluxo de ar de secagem, que ocasionou em um aumento na temperatura do ar de secagem de 14°C até um máximo de 27°C. Ao comparar o sistema com carga com o sistema sem carga observou-se que o sistema com carga apresentou maior eficiência térmica por causa da maior umidade do ar e menor eficiência exergética, devido a energia requerida para secar os grãos de milho.

2.2. MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático proposto para representar a secagem de grãos de milho é proveniente do trabalho de Tolentino (2018) e foi constituído por equações diferenciais parciais. Nos subtópicos a seguir são apresentadas as considerações e as equações que constituem o modelo matemático.

2.2.1. Considerações do Modelo Matemático

As considerações propostas do modelo matemático a seguir são baseadas em diversos trabalhos presentes na literatura (FRANÇA *et al.*, 1994; THORPE, 2008; RANJBARAN *et al.*, 2014; TOLETINO, 2018):

- Para se prever o comportamento da secagem em camada espessa é utilizado um modelo de secagem em camada fina;
- Durante o processo de secagem, a contração volumétrica do leito de grãos é desprezível;
- Os grãos de milho analisados estão em equilíbrio térmico e higroscópico internamente, ou seja, não há alteração de temperatura e de umidade no interior deles;
- As paredes do secador são adiabáticas;
- O ar de secagem entra no secador com velocidade e temperatura constantes;
- As propriedades físicas do ar de secagem se alteram a partir da temperatura e com o tempo;
- As propriedades físicas do leito de grãos se alteram a partir da umidade contida nos grãos e com o tempo;
- Considera-se a transferência de calor por condução entre os grãos;
- O comportamento do leito de grãos é aproximado ao comportamento de um meio poroso;
- Considera-se que toda energia gerada pela fonte térmica é convertida em calor de modo integral para ser aproveitada pelo ar de secagem.

2.2.2. Equações para o ar

Neste subtópico estão apresentadas as equações diferenciais referentes ao fluido utilizado para a secagem de grãos, que é o ar.

2.2.2.1. Conservação de massa

A conservação de massa para o ar de secagem em um meio poroso (NIELD & BEJAN, 2013) é apresentada na equação (1):

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

onde:

t = tempo [s];

e = porosidade [-];

ρ_a = massa específica do ar [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$];

\vec{v} = vetor velocidade para o ar [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

2.2.2.2. Quantidade de movimento

A quantidade de movimento para o ar de secagem, representada pela equação (2), segue o modelo de equação de quantidade movimento para os fluidos de Navier-Stokes, que considera a condição de não-deslizamento nas paredes do secador, velocidade do ar na entrada e pressão do ar na saída do secador pré-determinadas (ROCHA *et al.*, 2013; RANJBARAN *et al.*, 2014).

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

onde:

P = pressão [Pa];

\vec{g} = vetor aceleração da gravidade [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$];

S_m = massa específica do ar [$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$];

$\bar{\tau}$ = tensor de tensões de Reynolds [Pa].

O tensor de tensões de Reynolds para fluidos Newtonianos é dado pela equação (3) (RANJBARAN *et al.*, 2014).

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

sendo:

μ_a = viscosidade do ar [Pa·s];

I = tensor unitário [-].

O termo fonte da equação de conservação da quantidade de movimento é a resistência do leito de grãos ao escoamento do ar, o que gera uma queda de pressão do fluido à medida que este atravessa o meio poroso. A queda de pressão ocorre devido à perda de energia pelo atrito entre o ar e o grão (BROOKER *et al.*, 1974).

O cálculo da resistência do leito de grãos ao fluxo de ar é apresentado na equação (4) (THORPE *et al.*, 2008; ROCHA *et al.*, 2013; RANJBARAN *et al.*, 2014).

$$S_m = - \left(\frac{\mu_a}{\alpha} \vec{v} + C_2 \frac{1}{2} \rho_a \vec{v}^2 \right) \quad (4)$$

onde:

α = permeabilidade do leito de grãos [m²];

C_2 = fator de resistência inercial [m⁻¹].

O primeiro termo após o sinal de igualdade representa a resistência viscosa que é dada pela Lei do escoamento de Darcy para meios porosos (BEJAN *et al.*, 2004; BEJAN, 2013; NIELD & BEJAN; 2013). O segundo termo da equação apresenta as perdas inerciais para meios porosos.

O cálculo da resistência à passagem do ar ao longo do leito de grãos é representado pela equação (5) (HUNTER, 1983):

$$S_m = -Rv - Sv^2 \quad (5)$$

Onde R e S são constantes específicas para cada tipo de grão. Hunter (1983) fez um ajuste no modelo para o cálculo do gradiente de pressão ao longo do leito de grãos, propostos por Ergun (1952) utilizando dados para diferentes tipos de grãos apresentados por Shedd (1953), para obter os valores de R e S . Ao comparar as equações (4) e (5), é possível obter os valores de permeabilidade do leito de grãos α e do fator de resistência inercial C_2 através das equações (6) e (7).

$$R = \frac{\mu_a}{\alpha} \quad (6)$$

$$S = \frac{C_2 \rho_a}{2} \quad (7)$$

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 equação (5) assume um comportamento isotrópico para a resistência à passagem do ar, ou seja, os valores para a perda de pressão não dependem da direção do escoamento. Entretanto, na realidade, a queda de pressão na direção horizontal pode ter um valor entre 60% a 70% da queda de pressão para o fluxo de ar na direção vertical, o que resulta em um meio poroso não isotrópico (ASAE, 2011). Os testes experimentais para chegar na equação (5) foram realizados numa coluna de grãos com escoamento de ar na vertical. Sendo assim, foi assumido uma queda de pressão na direção horizontal de 70% da queda de pressão na direção vertical representada pela equação (5), que foi mesmo percentual utilizado no trabalho elaborado por Ranjbaran *et al.* (2014).

2.2.2.3. Balanço de umidade

O balanço de umidade para o ar, representado pela equação (8), onde S_w é o termo fonte, que é apresentado na equação (9) (RANJBARAN *et al.*, 2014; THORPE, 2008; TOLENTINO, 2018). 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.

$$\frac{\partial}{\partial t}(e\rho_a w) + \nabla \cdot (\rho_a \vec{v}w) = \nabla \cdot (\rho_a D_{eff} \nabla w) + S_w \quad (8)$$

sendo:

ρ_a = massa específica do ar [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$];

w = umidade absoluta do ar [$\text{kg}_{\text{água}}\cdot\text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$];

D_{eff} = coeficiente efetivo de difusão de umidade [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$].

$$S_w = -(1 - e)\rho_g \frac{\partial M}{\partial t} \quad (9)$$

sendo:

ρ_g = massa específica do milho [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$];

M = teor de umidade do leito de grãos [$\text{kg}_{\text{água}}\cdot\text{kg}_{\text{produto seco}}^{-1}$].

Vitorino (2009) apresenta uma equação experimental para esse coeficiente para o leito de grãos de milho (equação 10). 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).

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

onde:

T = temperatura absoluta do ar de secagem [K];

2.2.2.4. Conservação de energia

Tolentino (2018) apresenta uma equação a qual considera que o meio poroso e o fluxo de ar não estão em equilíbrio térmico e são propostas duas equações, sendo uma para conservação de energia para o ar de secagem e outra para o leito de grãos, com base no modelo apresentado

em diversos trabalhos na literatura (Brooker *et al.* 1974, MARTINS, 1982; FRANÇA *et al.*, 1994; SOUZA, 1996; SRIVASTAVA, 2002; ZARE *et al.* 2006; NAGHAVI *et al.*, 2010).

Assim a equação de conservação de energia para o ar é apresentada através da equação (11), onde E_a é a entalpia para o ar de secagem, que é representada na equação (12), e $S_{h,a}$ é o termo fonte representado pela equação (13) (HUNTER, 1983; ANSYS, 2018c; FAGHRI *et al.*, 2010).

$$\frac{\partial}{\partial t} [e\rho_a E_a] + \nabla \cdot (\rho_a \vec{v} E_a) = \nabla \cdot (ek_a \nabla T) + S_{h,a} \quad (11)$$

sendo:

k_a = coeficiente de condução térmica do ar [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

$$E_a = (c_a + c_v w)T \quad (12)$$

onde:

c_a = calor específico do ar seco [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

c_v = calor específico do vapor de água [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

$$S_{h,a} = -ha(T - \theta) \quad (13)$$

onde:

a = área superficial específica do grão [$\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$];

h = coeficiente convectivo [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$];

θ = temperatura absoluta do leito de grãos [K].

O coeficiente convectivo h é calculado pela equação (14) (BARKER, 1956; BROOKER *et al.*, 1974; ZARE *et al.*, 2006; NAGHAVI *et al.*, 2010).

$$h = 0,2755 \cdot c_a \rho_a |v| \left(\frac{2r_0 \rho_a |v|}{\mu_a} \right)^{-0,34} \quad (14)$$

onde:

r_0 = raio equivalente do grão de milho [m];

$|v|$ = módulo da velocidade na direção principal do escoamento [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Segundo Brooker *et al.* (1974) os parâmetros r_0 e a para o grão de milho valem 0,00451m e $784 \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$, respectivamente.

2.2.2.5. Equações de propriedades

As propriedades termodinâmicas para o ar de secagem são estimadas pelas equações (15) a (19) ((PAKOWSKI *et al.*, 1991; BROOKER *et al.*, 1974; FORTES *et al.*, 2006)

$$\rho_a = \frac{0,6219 \cdot P_{atm}}{287 \cdot T(0,6219 + w)} \quad (15)$$

$$\mu_a = 1,691 \cdot 10^{-5} + 4,984 \cdot 10^{-8}(T - 273,15) - 3,187 \cdot 10^{-11}(T - 273,15)^2 + 1,319 \cdot 10^{-14}(T - 273,15)^3 \quad (16)$$

$$c_a = 1009,26 - 4,0403 \cdot 10^{-3}(T - 273,15) + 6,1759 \cdot 10^{-4}(T - 273,15)^2 - 4,097 \cdot 10^{-7}(T - 273,15)^3 \quad (17)$$

$$c_v = 1883 - 1,6737 \cdot 10^{-1}T + 8,439 \cdot 10^{-4}T^2 - 2,6967 \cdot 10^{-7}T^3 \quad (18)$$

$$k_a = 7,331 \cdot 10^{-5}T + 0,004071 \quad (19)$$

onde:

ρ_a = massa específica do ar [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

P_{atm} = pressão atmosférica [Pa];

w = umidade absoluta do ar [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$];

μ_a = viscosidade do ar [$\text{Pa} \cdot \text{s}$];

T = temperatura absoluta do ar de secagem [K];

c_a = calor específico do ar seco [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

c_v = calor específico do vapor de água [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

k_a = condutividade térmica do ar [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

2.2.3. Equações para o leito de grãos

Neste subtópico serão apresentadas as equações diferenciais referentes ao grãos utilizado para a secagem, que é o milho

2.2.3.1. Equação empírica de secagem em camada fina

A equação de secagem de milho para camada fina proposta por Thompson *et al.* (1968) será utilizada para compor o modelo matemático, essa equação também é aplicada em outros trabalhos (FRANÇA *et al.*, 1994; MARTINS *et al.*, 1982; SOUZA, 1996), com o objetivo de prever o teor de umidade do leito de grãos de milho durante a secagem em uma camada espessa de grãos. A equação (20) apresenta a taxa de variação do teor de umidade do leito de grãos ao longo do tempo. A e B são constantes definidas pelas equações (21) e (22).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{M_e - M}{3600 \sqrt{A^2 + \left(\frac{1}{900}\right) Bt}} \quad (20)$$

$$A = -4,10497 + 0,008784 \cdot T \quad (21)$$

$$B = 1,66209 \cdot 10^9 e^{(-5,9418 \cdot 10^{-2} \cdot T)} \quad (22)$$

onde:

M = teor de umidade dos grãos [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto seco}}^{-1}$];

M_e = teor de umidade de equilíbrio para o milho [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto seco}}^{-1}$].

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. Para o presente trabalho é utilizada a equação (23) apresentada por Thompson *et al.* (1968)

$$M_e = \sqrt{\frac{\ln(1 - RH)}{-0,688 \cdot (T - 227)}} \quad (23)$$

A umidade relativa do ar RH e a pressão de saturação do vapor P_{vs} são calculadas pelas equações (24) e (25) (BROOKER, 1974; RANJBARAN *et al.*, 2014):

$$RH = \frac{P_{atm} w}{(0,62189 + w) P_{vs}} \quad (24)$$

$$P_{vs} = 100 \cdot e^{\left(27,0214 - \frac{6887}{T} - 5,31 \ln\left(\frac{T}{273,16}\right)\right)} \quad (25)$$

onde:

P_{atm} = pressão atmosférica [Pa];

P_{vs} = pressão de vapor de saturação [Pa];

w = umidade absoluta do ar [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$].

2.2.3.2. Conservação de energia

A conservação de energia para o leito de grãos é dada pela equação (26), onde E_g é a entalpia para o leito de grãos, representado pela equação (27) e $S_{h,g}$ é o termo fonte, representado pela equação (28) (NIELD & BEJAN, 2013; ANSYS, 2018c; FAGHRI *et al.*, 2010):

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - e)\rho_g E_g] = \nabla \cdot [(1 - e)k_g \nabla \theta] + S_{h,g} \quad (26)$$

sendo:

k_g = coeficiente de condução térmica do grão de milho [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

$$E_g = (c_g + c_w M)\theta \quad (27)$$

onde:

c_g = calor específico do grão de milho [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

c_w = calor específico da água líquida [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$].

$$S_{h,g} = ha(T - \theta) + [h_{fg} + c_v(T - \theta)](1 - e)\rho_g \frac{\partial M}{\partial t} \quad (28)$$

Onde h_{fg} é o calor latente de vaporização da água para o leito de grãos de milho, e é definido pela equação (29) (FRANÇA *et al.*, 1994; SOUZA, 1996).

$$h_{fg} = (3153518,6 - 2386,05T)(1 + 4,35e^{-28,25M}) \quad (29)$$

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.

2.2.3.3. Equações de propriedades

As propriedades para o leito de grãos são definidas pelas equações (30) a (34) (LASSERAN, 1978; ANDRADE *et al.*, 2004).

$$\rho_b = 702,76 + 595,71 \left(\frac{M}{1+M} \right) - 3434 \left(\frac{M}{1+M} \right)^2 \quad (30)$$

$$e = 0,39 + 0,095M \quad (31)$$

$$\rho_g = \frac{\rho_b}{(1-e)} \quad (32)$$

$$(c_g + c_w M) = 1132,7 + 5445,3 \left(\frac{M}{1+M} \right) \quad (33)$$

$$k_g = 0,10473 + 0,434 \left(\frac{M}{1+M} \right) \quad (34)$$

onde:

ρ_g = massa específica do grão de milho [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$];

ρ_b = massa específica aparente em bulbo seco do leito de grãos [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$];

e = porosidade em bulbo seco do leito de grãos [-];

M = teor de umidade em bulbo seco do leito de grãos [$\text{kg}_{\text{água}}\cdot\text{kg}_{\text{produto seco}}^{-1}$];

c_g = calor específico do grão de milho [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

c_w = calor específico da água líquida [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

k_g = condutividade térmica do grão de milho [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$];

Nota-se que a equação (32) representa o termo $(c_g + c_w M)$ da entalpia para o leito de grãos E_g , dada pela equação (27), e leva em consideração o calor específico do grão de milho seco e o calor específico da água contida nos grãos.

2.2.4. Modelo de Turbulência

Como o processo de secagem se trata de um escoamento de um fluido é necessário determinar se o escoamento é laminar ou turbulento. Para as condições apresentadas, o número

de Reynolds é superior a 2500. Logo o escoamento para os experimentos de secagem é turbulento.

Dentro do ambiente do software é necessário escolher o modelo de viscosidade como sendo turbulento, porém o software ANSYS Fluent possui variadas opções de modelos de turbulência. De acordo com ANSYS (2018c) a escolha dependerá das considerações físicas do fluxo, o nível de precisão exigido, os recursos computacionais utilizados e a quantidade de tempo disponível para realizar a simulação. Segundo o ANSYS (2018c) o modelo k-epsilon apresenta robustez e precisão razoável para uma ampla gama de fluxos turbulentos, sendo o mais utilizado em simulações de fluxo industrial e transferência de calor, sendo assim o escolhido para o projeto. Dentro do modelo k-epsilon existem três variantes, que são Standard, RNG e Realizable, sendo a variante Realizable recomendada em relação as outras duas (ANSYS, 2018c).

O modelo k-epsilon realizable apresenta duas novas equações para a construção do modelo matemático anteriormente apresentado, que são a energia cinética turbulenta (k), representado pela equação (35) e a dissipação da energia cinética turbulenta (ε), representado pela equação (36) (VISCONCINI, 2019).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial X_j}(\rho k v) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial X_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (35)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial X_j}(\rho \varepsilon v) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (36)$$

onde:

k = Energia cinética turbulenta [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$]

ε = Dissipação da energia cinética turbulenta [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$]

G_k = geração de energia cinética turbulenta [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$];

G_b = geração de energia cinética devido a flutuação [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$];

Y_M = dissipação da dilatação em escoamentos compressíveis [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$];

C_1, C_2 e C_3 = constantes empíricas fornecidas pelo ANSYS Fluent [-];

σ_k e σ_ε = números de Prandtl para as equações k e ε [-];

S_k = Termo fonte da energia cinética turbulenta [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{m}^{-1}$]

S_ε = Termo fonte da dissipação de energia cinética turbulenta [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-4}\cdot\text{m}^{-1}$];

μ_t = viscosidade turbulenta [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$];

O software ANSYS Fluent calcula automaticamente os valores energia cinética turbulenta (k) e a dissipação da energia cinética turbulenta (ε), sendo abordado com mais detalhes na seção 3.3.

2.2.5. Análise Energética e Exergética da Secagem

Ranjbaran e Zare (2013) apresentam uma definição de eficiência energética do processo de secagem η_e , dada pela equação (37). Tolentino (2018) afirma que esta presente definição de eficiência energética foca apenas na secagem da umidade contida nos grãos, ignorando o gasto energético para a elevação da temperatura da água evaporada e dos grãos.

$$\eta_e = \frac{\text{energia demandada para evaporar a umidade contida nos grãos}}{\text{energia fornecida ao escoamento de secagem}} \quad (37)$$

A energia que entra no sistema pelo ar de secagem (E_T) é resultado da soma das energias necessárias para o funcionamento do secador. Para o secador, que é objeto de estudo, E_T é proveniente da soma da energia das resistências elétricas de aquecimento, da energia pelo insuflamento de ar pelo ventilador e pela energia requerida para o funcionamento do circuito de controle do secador. Segundo Dias (2019), a energia demandada para evaporar a umidade contida nos grãos (E_V), é calculada pelo produto do calor latente de vaporização da água, representada pela equação (29) apresentada anteriormente, com a massa de água evaporada (m_{eva}), conforme a equação (38).

$$E_V = h_{fg}m_{eva} \quad (38)$$

onde:

m_{eva} = massa de água evaporada [$\text{kg}_{\text{água}}$];

O calor latente de vaporização da água para o leito de grãos (h_{fg}) é dependente de dois parâmetros: a temperatura do leito de grãos e o teor de umidade médio do leito de grãos. Para determinar a temperatura do leito, Dias (2019) realizou medições de temperatura em 4 pontos em diferentes alturas da câmara de secagem e depois fez a média aritmética. No software *ANSYS Fluent*, é possível obter a temperatura do leito de grãos buscando os mesmos 4 pontos utilizados por Dias (2019) e realizar uma média aritmética para compor o cálculo do h_{fg} .

A massa de água evaporada (m_{eva}) é obtida através da variação de massa do leito de grãos, representada pela equação (39).

$$m_{eva} = m_{g,i,ant} - m_{g,i} \quad (39)$$

onde:

$m_{g,i}$ = massa do leito de grãos no instante medido [$\text{kg}_{\text{produto}}$];

$m_{g,i,ant}$ = massa do leito de grãos no medido no instante anterior [$\text{kg}_{\text{produto}}$];

De acordo com Tohidi *et al.* (2017), $m_{g,i}$ pode ser obtida a partir da equação (40).

$$m_{g,i} = \frac{m_{g,0}(M_{0,bu} - 1)}{(M_{i,bu} - 1)} \quad (40)$$

onde:

$m_{g,0}$ = massa de milho no início do experimento [$\text{kg}_{\text{produto}}$];

$M_{0,bu}$ = teor de umidade inicial dos grãos em base úmida [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto}}^{-1}$];

$M_{i,bu}$ = teor de umidade instantâneo dos grãos em base úmida [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto}}^{-1}$];

$M_{i,bu}$ pode ser obtido a partir da equação (41).

$$M_{i,bu} = \frac{M_{i,bs}}{1 + M_{i,bs}} \quad (41)$$

onde:

$M_{i,bs}$ = teor de umidade instantâneo dos grãos em base seca [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto}}^{-1}$];

Para se obter os valores da energia que entra no secador (E_T), Dias (2019) realizou medições com a utilização de um wattímetro. Logo a eficiência energética está ligada as condições de funcionamento do equipamento de secagem e não apenas ao processo de secagem. Então, nos valores das eficiências energéticas experimentais estão presentes todas as perdas envolvidas no processo devido as condições operacionais do secador, o que representa que essas eficiências estão ligadas, tanto ao equipamento, quanto ao processo de secagem em si.

Dias (2019) propõe em seu trabalho a utilização de uma eficiência energética teórica para que o cálculo da eficiência seja apenas do processo de secagem em si. Essa eficiência energética teórica é representada pela eq. (42).

$$\eta_{e,teórico} = \frac{E_V}{E_e} \quad (42)$$

onde:

E_V = energia de vaporização da umidade dos grãos [kJ];

E_e = energia necessária para aquecer o ar da temperatura ambiente até a temperatura de entrada do secador [kJ].

De acordo com Dias (2019) E_e pode ser obtido pela eq. (43).

$$E_e = m_a(h_e - h_{amb}) \quad (43)$$

onde:

m_a = massa de ar que ganhou temperatura [kg];

h_e = entalpia do ar na condição de entrada [kJ];

h_{amb} = entalpia do ar na condição de entrada [kJ];

De acordo com Aghbashlo (2013), a análise exergética de sistemas de secagem tem como principal objetivo fornecer uma clara imagem do processo, para que se possa quantificar as fontes de ineficiência, para distinguir a qualidade do consumo de energia, para selecionar as condições de secagem ideais e para reduzir o impacto ambiental da secagem.

O modelo de eficiência teórica elaborado por Dias (2019) foi apresentado apenas para a eficiência energética, logo é necessária outra metodologia para realizar o cálculo da eficiência exergética.

Amantéa et al. (2013) e Ranjbaran et al. (2014) apresenta na eq. (44) um modelo de cálculo para eficiência exergética (η_{ex}) entre um intervalo de tempo t até $t + \Delta t$ onde a somatória das exergias demandadas para cada um dos volumes de controle representa a exergia total para evaporar a umidade do leito de grãos. A eq. (45) apresenta a solução da integral apresentada na eq. (44):

$$\eta_{ex} = \frac{\int_t^{t+\Delta t} \int_0^V \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) (1 - \varepsilon) \rho_g \frac{\partial M}{\partial t} h_{fg} dV dt}{\int_t^{t+\Delta t} \dot{E}x_{a,in} dt} \quad (44)$$

$$\eta_{ex} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) (1 - \varepsilon) \rho_g \frac{\partial M}{\partial t} h_{fg} \delta V \right]_i \Delta t}{\dot{E}x_{a,in} \Delta t} \quad (45)$$

onde:

$\dot{E}x_{a,in}$ = taxa de exergia que entra no secador pelo ar de entrada [W];

O termo $\dot{E}x_{a,in}$ é calculado pela eq. (46):

$$\dot{E}x_{a,in} = \dot{m}_{a,in} \Delta \psi \quad (46)$$

onde:

$\Delta \psi$ = exergia específica do escoamento total do ar [J/kg];

O cálculo da $\Delta\psi$ é realizado a partir da eq. (47) (DINCER & SAHIN, 2004; BEJAN, 2006; AMANTÉA *et al.*, 2013):

$$\Delta\psi = (c_a + c_v w_{in}) \left(T_{a,in} - T_0 - T_0 \ln \frac{T_{a,in}}{T_0} \right) + (1 + 1,608 w_{in}) R_a T_0 \ln \frac{P_{a,in}}{P_{00}} + R_a T_0 \left[(1 + 1,608 w_{in}) \ln \left(\frac{1 + 1,608 w_{00}}{1 + 1,608 w_{in}} \right) + 1,608 w_{in} \ln \left(\frac{1,608 w_{00}}{1,608 w_{in}} \right) \right] \quad (47)$$

onde:

R_a = constante universal dos gases específica para o ar [J/kg.K];

w_{in} = umidade absoluta do ar na entrada do secador [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$];

$P_{a,in}$ = pressão do ar na entrada do secador [Pa]

P_{00} = pressão do ar no estado morto [Pa];

w_{00} = umidade absoluta do ar no estado [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$];

Os valores de umidade absoluta e pressão atmosférica no estado morto foram utilizados de cada experimento da dissertação de Dias (2019).

2.2.6. Equações recentes da literatura

Equações mais recentes encontradas na literatura foram introduzidas no modelo com o objetivo de substituir equações mais antigas. Foram encontradas 3 equações, sendo duas equações para o calor latente de vaporização da água para o leito de grãos e uma para o teor de umidade de equilíbrio para o milho.

2.2.6.1. Calor latente de vaporização da água para o leito de grãos de milho

Dos Santos (2020) propõe determinar e modelar as isotermas de adsorção dos grãos de milho em diferentes temperaturas e também determinar o calor latente de vaporização da água, que é representada pela equação (48).

$$h_{fg} = (2502,2 - 2,39T)(1 + a \cdot e(-b \cdot M_e^m)) \quad (48)$$

onde:

M_e = teor de umidade de equilíbrio para o milho [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto seco}}^{-1}$];

a , b e m = coeficientes empíricos de ajuste do modelo. Onde $a = 0,2707$, $b = 23,8919$ e $m = 1,7439$;

T = temperatura absoluta do ar de secagem [K];

Wei (2020) também apresenta uma equação para o calor latente de vaporização do milho, representada pela eq. (49).

$$h_{fg} = 383650(647,1 - T)^{0,316}(1 + 0,8953e^{-12,32M}) \quad (49)$$

onde:

M = teor de umidade dos grãos [$\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto seco}}^{-1}$];

2.2.6.2. Teor de umidade de equilíbrio para o milho

O teor de umidade de equilíbrio para o milho pode ser definido pela equação (50) (WEI, 2020):

$$M_e = \left(\frac{-\ln(1 - RH)}{8,654 \times 10^{-5}(T - 223,34)} \right)^{(1/1,8634)} \quad (50)$$

onde:

RH = Umidade relativa do ar [%];

2.2.7. Resumo das Equações

As equações diferenciais parciais a serem solucionadas juntamente com as condições iniciais e de contorno estão listadas abaixo nas tabelas de 1 a 4 para o caso bidimensional:

Tabela 1. Condições iniciais e condições de contorno da equação da umidade absoluta do ar

E.D.P.	$\frac{\partial}{\partial t}(e\rho_a w) + \nabla \cdot (\rho_a \vec{v}w) = \nabla \cdot (\rho_a D_{eff} \nabla w) + S_w$	$0 < y \leq 0,2$	$t > 0$
C.C.	$w = w_{in}$	$y = 0$	$t > 0$
C.I.	$w = w_0$	$0 \leq y \leq 0,2$	$t = 0$

Fonte: Elaborado pelo autor

A umidade absoluta inicial do ar (w_0), dada pela equação (51) pode ser encontrada isolando o termo w na equação (24), onde P_{atm} é a pressão atmosférica, P_{vs} é a pressão de vapor de saturação dada pela eq. (25) e RH_0 é o valor inicial para umidade relativa do ar.

$$w_0 = \frac{0.62189RH_0 P_{vs}}{P_{atm} - RH_0 P_{vs}} \quad (51)$$

A umidade relativa inicial do ar (RH_0), dada pela equação (52), pode ser encontrada isolando o termo RH da equação (23), onde T_0 é a temperatura inicial do ar e $M_{0,bs}$ é o teor de umidade inicial de grãos em base seca.

$$RH_0 = 1 - e^{-0,688(T_0-227)M_{0,bs}^2} \quad (52)$$

Tabela 2. Condições iniciais e condições de contorno da equação do teor de umidade do leito

E.D.P.	$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{M_e - M}{3600 \sqrt{A^2 + \left(\frac{1}{900}\right) Bt}}$	$0 \leq y \leq 0,2$	$t > 0$
C.I.	$M = M_0$	$0 \leq y \leq 0,2$	$t = 0$

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3. Condições iniciais e condições de contorno da equação da temperatura do ar

E.D.P.	$\frac{\partial}{\partial t} [e\rho_a E_a] + \nabla \cdot (\rho_a \vec{v} E_a) = \nabla \cdot (ek_a \nabla T) + S_{h,a}$	$0 < y \leq 0,2$	$t > 0$
C.C.	$T = T_{in}$	$y = 0$	$t > 0$
C.I.	$T = T_0$	$0 \leq y \leq 0,2$	$t = 0$

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4. Condições iniciais e condições de contorno da equação da temperatura do leito de grãos

E.D.P.	$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - e)\rho_g E_g] = \nabla \cdot [(1 - e)k_g \nabla \theta] + S_{h,g}$	$0 \leq y \leq 0,2$	$t > 0$
C.I.	$\theta = \theta_0$	$0 \leq y \leq 0,2$	$t = 0$

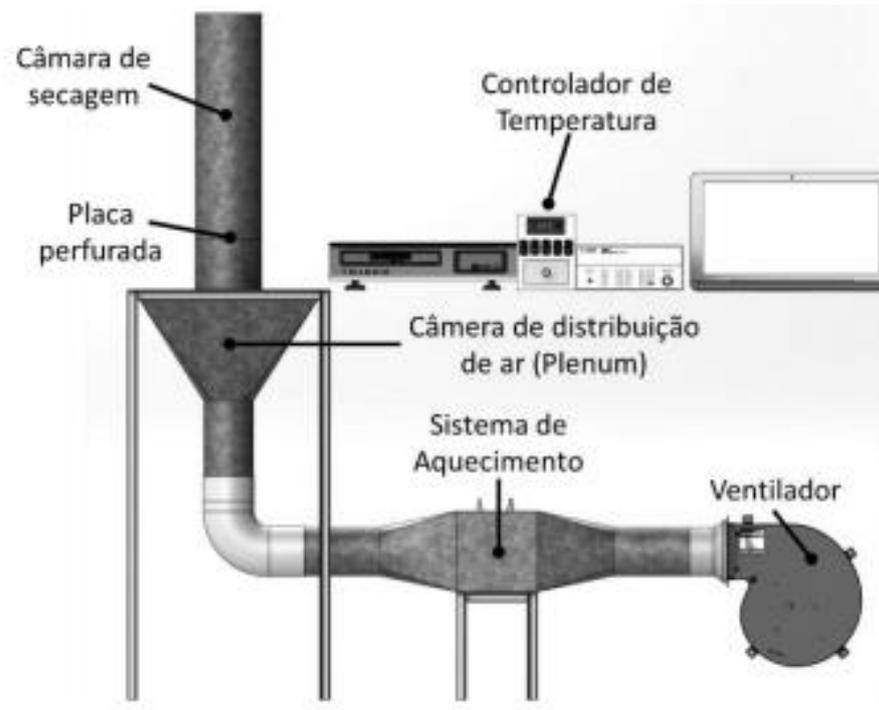
Fonte: Elaborado pelo autor

2.3. DESCRIÇÃO DO SECADOR E DADOS EXPERIMENTAIS

O modelo matemático proposto foi validado utilizando os resultados de um secador experimental. Este secador possui um escoamento unidimensional com fluxo vertical de ar e foi construído por Dias (2019) com base em recomendações observadas na literatura. Dias (2019) realizou 6 experimentos de secagem de milho, que tiveram duração de 120 minutos e ocorreram em uma camada espessa com leito cilíndrico de 130mm de diâmetro e 200mm de altura, utilizando as temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C, e as velocidades de 0,8 e 1,3m.s⁻¹ para o ar de secagem. Na figura 1 é apresentado o desenho do secador que realizou as simulações experimentais e a figura 2 apresenta o desenho esquemático da câmara de secagem do secador

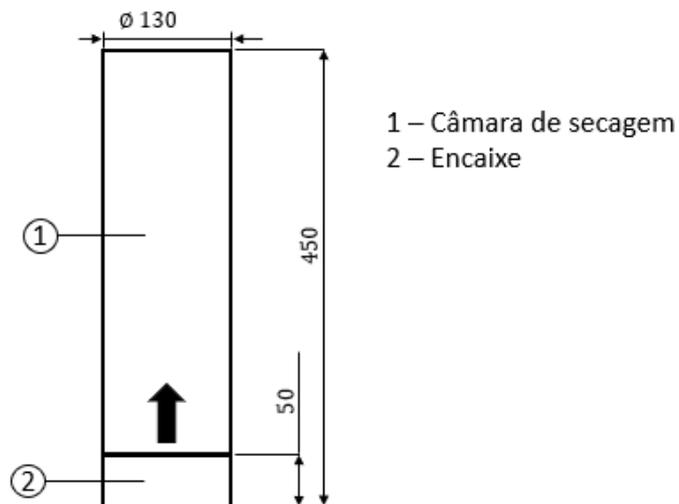
elaborado por Dias (2019). Vale ressaltar que apesar da câmara de secagem possuir uma altura total de 450mm, o leito de grãos utiliza um total de 200mm de altura.

Figura 1. Secador experimental em leito fixo construído por Dias (2019)



Fonte: Dias, 2019

Figura 2. Vista frontal da câmara de secagem de Dias (2019)



Fonte: Adaptada de DIAS, 2019

Vale ressaltar que apesar da câmara de secagem possuir uma altura total de 450mm, o leito de grãos utiliza um total de 200mm de altura. O local conhecido como encaixe permite conectar a câmara de secagem com a câmara de distribuição de ar.

Na tabela 5 são apresentadas as condições na entrada do secador para os 6 testes de secagem experimentais feitos por Dias (2019), onde os parâmetros medidos foram:

- Temperatura inicial do ar intergranular: T_0 ;
- Teor de umidade inicial do leito de grãos em base seca: $M_{0,bs}$;
- Temperatura inicial do leito de grãos: θ_0 ;
- Umidade absoluta na entrada do secador: w_{in} ;
- Temperatura do ar de secagem na entrada do secador: T_{in} ;
- Velocidade do ar na entrada do secador: v_{in} ;
- Umidade relativa do ar na entrada do secador: RH_{in} ;
- Pressão atmosférica na saída do secador: P_{atm} ;

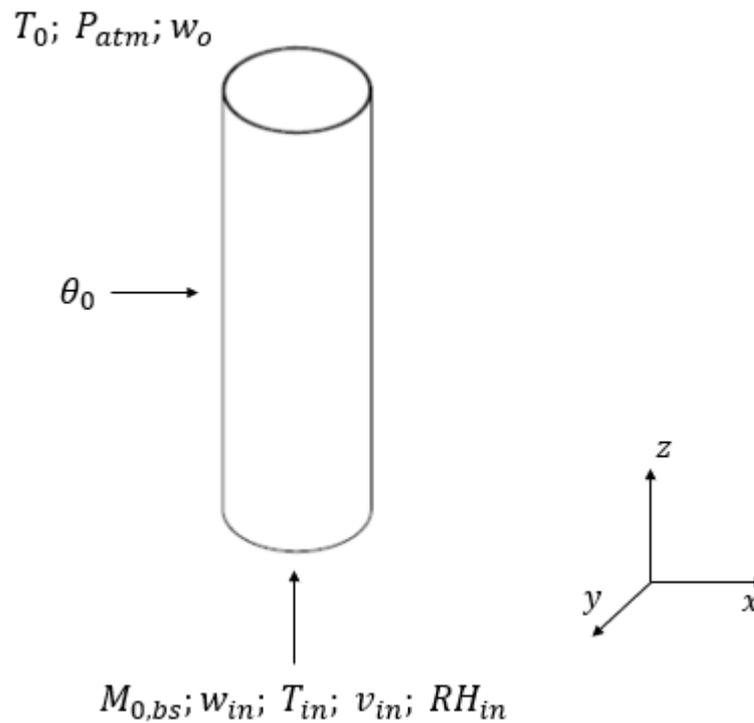
Tabela 5. Dados experimentais das condições iniciais e de contorno do secador – DIAS, 2019

Teste	T_0 [°C]	$M_{0,bs}$ [kg _{água} ·kg _{produto seco} ⁻¹]	θ_0 [°C]	w_{in} [kg _{água} ·kg _{ar seco} ⁻¹]	T_{in} [°C]	v_{in} [m·s ⁻¹]	RH_{in} [%]	P_{atm} [kPa]
1	28,3	0,220	26,7	0,007098	42,3	0,8	58	92,32
2	26,1	0,225	23,9	0,004821	39,8	1,3	45	92,58
3	30,2	0,220	27,0	0,005268	50,3	0,9	53	92,31
4	27,0	0,221	24,0	0,003870	50,5	1,3	57	92,58
5	27,9	0,225	23,6	0,002289	60,6	0,8	48	92,31
6	25,0	0,221	24,8	0,001495	60,2	1,3	44	92,58

Fonte: Dias, 2019

Na figura 3 é apresentado uma visualização das condições de entrada do secador.

Figura 3. Representação esquemática das condições iniciais e de contorno do ar e condição inicial milho dentro do secador



Fonte: Elaborado pelo autor

2.4. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

O modelo matemático foi desenvolvido no ambiente do software ANSYS Fluent, e foi utilizado também uma ferramenta de manipulação denominada UDF (User-Defined Functions), que permitiu a realização de alguns procedimentos. As equações diferenciais parciais apresentadas anteriormente foram resolvidas através método dos volumes finitos para cada volume de controle gerado. Neste tópico estão contidas informações referentes ao método dos volumes finitos, as UDF utilizadas, a ativação do modelo matemático e o teste de malha.

2.4.1. Método dos Volumes Finitos

Segundo Maliska (2010) os métodos tradicionais para a solução numérica de equações diferenciais são os Métodos de Diferenças Finitas (MDF), de Elementos Finitos (MEF) e de Volumes Finitos (MVF). Sendo que, historicamente, o MDF foi sempre usado na área de

mecânica fluidos, durante o mesmo tempo que o MEF foi sempre usado para a área estrutural na solução de problemas de elasticidade.

O MDF, apesar de apresentar grande facilidade para tratar problemas na área de fluidos, não tem habilidade para tratar geometrias complexas. Já o MEF é um método hábil para tratar geometrias mais complexas, porém não possui ferramentas necessárias para tratar problemas com a presença de termos advectivos nas equações do movimento (MALISKA, 2010).

O MVF possibilitou a associação da interpretação física e matemática, o que contribuiu para que o MDF fosse substituído pelo MVF, onde esse método realiza um balanço de conservação da propriedade para cada volume a fim de se obter a correspondente da equação aproximada. Recentemente, um grande esforço é empreendido na pesquisa para o desenvolvimento do método em volumes finitos em função da sua robustez, devido a suas características conservativas (MALISKA, 2010).

De acordo com Maliska (2010), as equações de conservação em formato diferencial e no sistema de coordenadas cartesianas para o MVF podem ser representadas de forma geral pela eq. (53).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \cdot \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \cdot \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \cdot \phi) \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) + S^\phi \end{aligned} \quad (53)$$

onde:

- $\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)$ = termo temporal;
- $\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \cdot \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \cdot \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \cdot \phi)$ = termo advectivo;
- $\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial z}\right)$ = termo difusivo;
- S^ϕ = termo fonte.

O primeiro termo da eq. (53) é o termo temporal e tem a função de avançar a solução no tempo e representa a variação da propriedade de interesse ϕ dentro do volume de controle. Os outros termos, ainda do lado esquerdo da equação, representam o balanço advectivo da variável

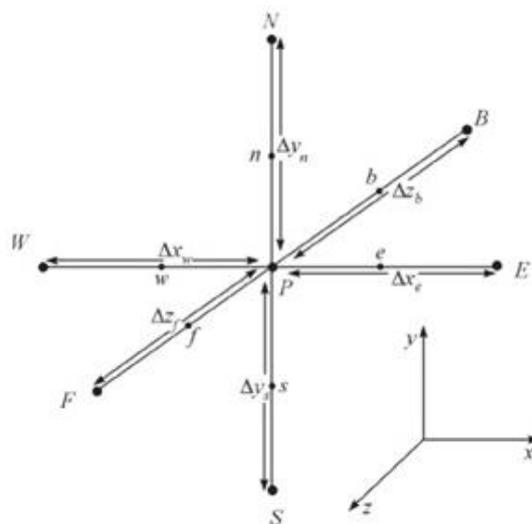
\emptyset . O termo advectivo e o termo temporal tem apenas uma derivada que ao ser integrada, resultará em apenas uma constante. Os três primeiros termos do lado direito representam o balanço dos fluxos difusivos e requerem o estabelecimento de condições de contorno em toda fronteira do domínio, já que as informações físicas contidas no termo difusivo se transmitem em todas as direções coordenadas. Por fim o termo fonte é o responsável por acomodar todos aqueles termo que não se encaixam na forma apresentada pela eq. (53).

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), o Método dos Volumes Finitos é um algoritmo numérico que consiste nas seguintes etapas:

1. Integração das equações governantes de fluxo sobre todos as partes menores (ou volumes de controle) do domínio;
2. Discretização: Conversão das equações integrais resultantes em um sistema de equações algébricas;
3. Solução das equações algébricas por um método iterativo.

A primeira etapa, que consiste na integração do volume de controle, é o que distingue o método dos volumes finitos das outras técnicas do CFD. A eq. (53) deve ser integrada no tempo e no espaço e o volume elementar é apresentado na figura 4, onde para facilitar a especificação das dimensões, apenas as retas que unem os centros dos volumes de controle são mostradas. As interfaces do volume de controle centrado em P são identificadas por letras minúsculas.

Figura 4. Volume elementar tridimensional



Fonte: Maliska, 2010

A integral da eq. (53) é demonstrada na eq. (54) e o resultado da integração da equação de conservação para Φ no tempo e sobre o volume centrado em P é apresentada na eq. (55).

$$\begin{aligned}
& \int_{V,t} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\Phi) dVdt + \int_{V,t} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \cdot \Phi) dVdt + \int_{V,t} \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \cdot \Phi) dVdt + \int_{V,t} \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \cdot \Phi) dVdt \\
&= \int_{V,t} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) dVdt + \int_{V,t} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) dVdt + \int_{V,t} \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) dVdt \quad (54) \\
&+ \int_{V,t} S^\Phi dVdt
\end{aligned}$$

A discretização da eq. (54) é apresentada na eq. (55), e é a partir dela que se pode formar um sistema de equações algébricas para em seguida utilizar algum método iterativo para solução das equações algébricas.

$$\begin{aligned}
& \frac{M_P \Phi_P - M_P^o \Phi_P^o}{\Delta t} + \dot{M}_e \Phi_e^\theta - \dot{M}_w \Phi_w^\theta + \dot{M}_n \Phi_n^\theta - \dot{M}_s \Phi_s^\theta + \dot{M}_f \Phi_f^\theta - \dot{M}_b \Phi_b^\theta \\
&= D_1 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e^\theta - D_1 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w^\theta + D_2 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_n^\theta - D_2 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_s^\theta + D_3 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_f^\theta - D_3 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_b^\theta \quad (55) \\
&+ L[S^\Phi]^\theta
\end{aligned}$$

Onde os fluxos de massa e os coeficientes difusivos são dados por:

- $\dot{M}_e = \rho u \Delta y \Delta z|_e$;
- $\dot{M}_w = \rho u \Delta y \Delta z|_w$;
- $\dot{M}_n = \rho v \Delta x \Delta z|_n$;
- $\dot{M}_s = \rho v \Delta x \Delta z|_s$;
- $\dot{M}_f = \rho w \Delta x \Delta y|_f$;
- $\dot{M}_b = \rho w \Delta x \Delta y|_b$;
- $D_{1e} = \Gamma^\Phi \Delta y \Delta z|_e$;
- $D_{1w} = \Gamma^\Phi \Delta y \Delta z|_w$;

- $D_{2n} = \Gamma^\theta \Delta x \Delta z \Big|_n$;
- $D_{2s} = \Gamma^\theta \Delta x \Delta z \Big|_s$;
- $D_{3f} = \Gamma^\theta \Delta x \Delta y \Big|_f$;
- $D_{3b} = \Gamma^\theta \Delta x \Delta y \Big|_b$;

O sobrescrito θ , significa que a variável em integração ao longo do intervalo de tempo é avaliada em uma posição intermediária entre o instante t e o instante $t + \Delta t$, originando as formulações totalmente implícita, implícita e explícita. Os fluxos de massa nas interfaces também são avaliados em θ (MALISKA, 2010).

O termo $L[S^\theta]^\theta$ representa a linearização do termo fonte, que é uma técnica para evitar que o processo da solução do sistema de equações divirja (MALISKA, 2010).

A discretização, apresentada de forma simplificada anteriormente, é utilizada pelo *ANSYS Fluent*. Além disso, o *ANSYS Fluent* permite escolher quais técnicas de discretização adicionais podem ser utilizadas:

- *SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)*: Fornece um método de cálculo de pressão e velocidade.
- *Second-Order Implicit Method*: técnica utilizada para discretização do termo transiente
- *Second-Order Upwind Scheme*: técnica para a discretização espacial dos termos advectivo e difusivos com o objetivo de minimizar as oscilações numéricas
- *Least Squares Cell-Based Gradient Evaluation*: técnica onde se assume que a solução varia linearmente

As técnicas apresentadas anteriormente tem como objetivo aumentar a precisão dos resultados da simulação numérica, mas vale mencionar que com isso, o tempo de processamento se torna maior.

Existem diversos métodos de solução para resolver o sistema de equações algébricas geradas pela discretização. O software *ANSYS Fluent* resolve o sistema de equações utilizando o método implícito Gauss-Seidel de ponto a ponto ligadamente com o método Multigrid. (ANSYS, 2018c)

O método Gauss-Seidel resolve o sistema linear passando equação por equação, iterativamente, usando durante um mesmo ciclo iterativo, de valores das variáveis já calculadas nesse ciclo, com o objetivo de acelerar a convergência. O método Multigrid auxilia na convergência das equações de conservação (MALISKA, 2010).

A cada iteração realizada, é calculado o resíduo produzido para cada uma das equações de governo discretizadas. Esse processo iterativo é devido à natureza não-linear das equações e ocorre até que o resíduo seja menor do que a tolerância especificada e quando isso ocorre a simulação passa para o próximo passo no tempo.

Por fim, é importante ressaltar o uso dos fatores de relaxamento que fazem parte do *ANSYS Fluent*. Eles são importantes para construção da simulação numérica, pois garantem que a solução de uma etapa para a próxima, não se altere muito, evitando deixar a solução instável.

2.4.2. User-Defined Function (UDF)

As UDF são funções definidas pelo usuário, onde é permitido ao usuário aprimorar os recursos padrões do software *ANSYS Fluent*. As UDF são escritas na linguagem de programação C e podem ser escritas em qualquer editor de texto e o arquivo do código deve ser salvo utilizando a extensão .c. Para o presente trabalho, o editor de texto utilizado foi o *Microsoft Visual Studio*. Além disso, as UDF são definidas utilizando a macro DEFINE e são executadas como funções interpretadas ou compiladas. A função interpretada executa o código “linha por linha” instantaneamente e não requer um compilador, que é o caso das funções compiladas. As UDF neste trabalho foram utilizadas com as seguintes funções:

- 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 a eficiência exergética de secagem durante o tempo;

O software *ANSYS Fluent* possui algumas macros pré-estabelecidas que podem ser utilizadas para criação da UDF (ANSYS, 2018b). As macros utilizadas no programa são apresentadas no Apêndice A.

2.4.3. Aplicação do modelo matemático no *ANSYS Fluent*

O modelo matemático construído por Tolentino (2018) foi aplicado com novas equações de propriedades da literatura para a geometria do secador experimental construído por Dias (2019), sendo também que as condições iniciais e de contorno também são provenientes do trabalho de Dias (2019). Para que o modelo matemático esteja apto a simular no ambiente do software *ANSYS Fluent* são necessárias algumas etapas:

- A primeira etapa consiste em construir a geometria do secador estudado no programa *DesignModeler* que é um ambiente do *ANSYS Fluent*. No *DesignModeler*, o usuário consegue elaborar a geometria desejada, seja ela bidimensional ou tridimensional.
- A próxima etapa consiste na elaboração da malha, onde a geometria elaborada no *DesignModeler* é importada para o ambiente *Meshing* do *Fluent*, onde o usuário é capaz de definir o tamanho dos volumes de controle, que também podem ser chamados de elementos. Além disso, é possível refinar a malha com diversas funções para que a qualidade dessa malha seja alta. De acordo com o Ansys (2018c), é recomendado que o parâmetro chamado de qualidade ortogonal mínima, que representa a qualidade da malha, seja maior que 0,1.
- No ambiente do *Setup* é possível selecionar a direção do vetor gravidade, o regime do escoamento (permanente ou transiente), selecionar quais os modelos serão implementados, definir se o escoamento é laminar ou turbulento, habilitar a equação de energia aplicar as UDF, definir as condições iniciais e de contorno e se o modelo térmico é de equilíbrio ou não-equilíbrio. O modelo térmico de não-equilíbrio do ANSYS Fluent para meios porosos é baseado em uma abordagem de células duplas, ou seja, para cada célula de fluido (porosa), existe uma segunda célula sólida e estas estão sobrepostas, sendo espacialmente coincidentes (TOLENTINO, 2019). Ao ativar o modelo de não-equilíbrio, o ANSYS Fluent

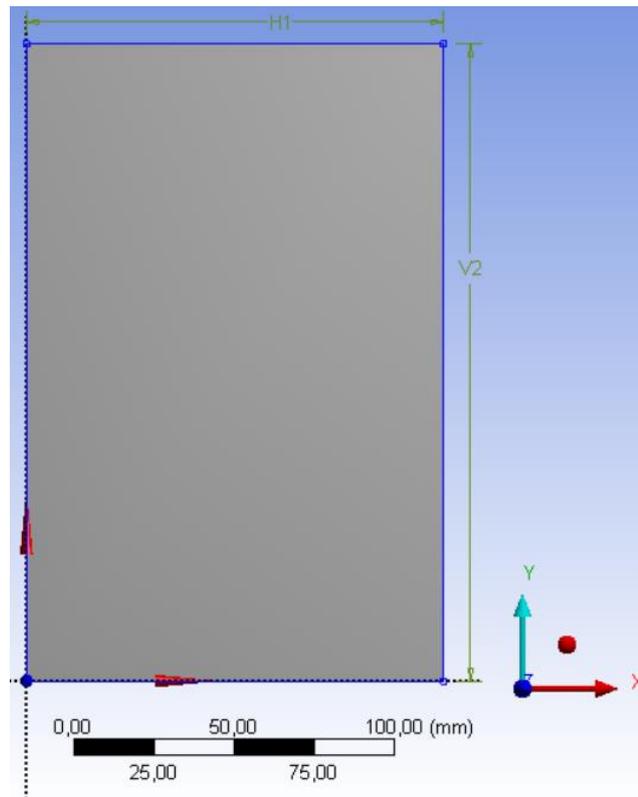
cria automaticamente uma célula sólida que é uma duplicata da célula de fluido poroso, sendo a célula fluido como o ar e a célula sólida como o milho. O software busca solucionar as equações diferenciais parciais do modelo matemático para ambas as células de maneira simultânea, porém separadas, sendo que a interação das células sobrepostas ocorre pela 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, 2018c).

- No ambiente *Parameters & Customization* é o local onde as UDF são interpretadas ou compiladas e também onde algumas UDF podem ser ativadas;
- No ambiente *Solution* são definidos os fatores de relaxamento, os métodos de resolução das equações diferenciais e o local onde os arquivos serão salvos.
- Nos *Results* são apresentados os resultados da simulação, também é conhecido como pós-processamento.

2.4.3.1. Construção da geometria do secador

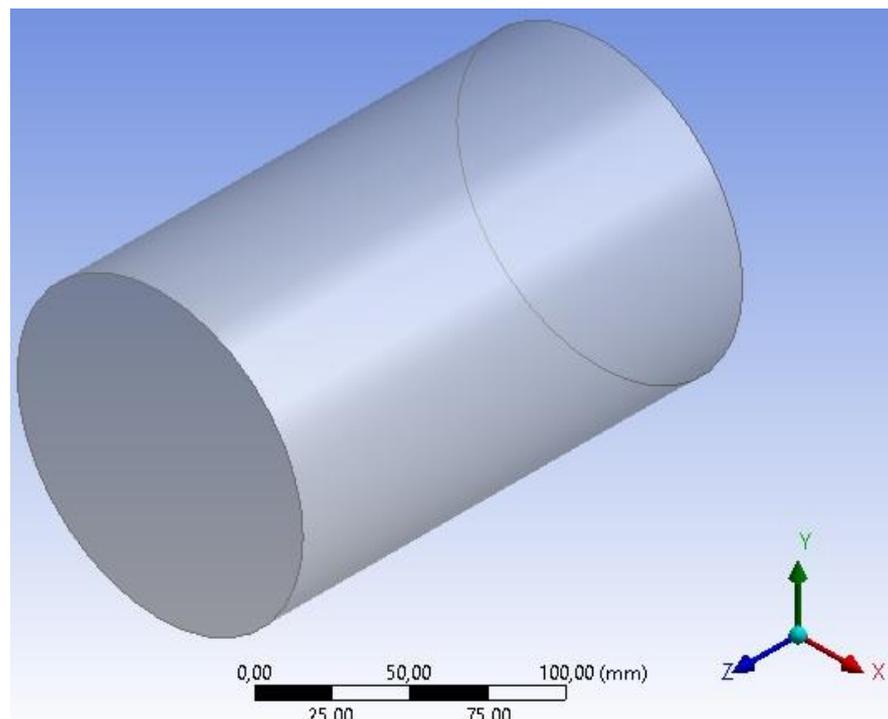
O secador elaborado por Dias (2019) possui uma câmara de secagem de 130x200mm, que é onde ocorre o processo de secagem. Foram construídas duas geometrias sendo uma bidimensional e outra tridimensional para representar a câmara de secagem de Dias (2019). O desenho da câmara de secagem em apenas uma dimensão é apresentado na figura 5 e o desenho da câmara de secagem tridimensional é apresentado na figura 6. A geometria bidimensional foi utilizada para uma simulação unidimensional em virtude das condições de contorno.

Figura 5. Geometria bidimensional da câmara de secagem do secador de Dias (2019)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6. Geometria tridimensional da câmara de secagem do secador de Dias (2019)

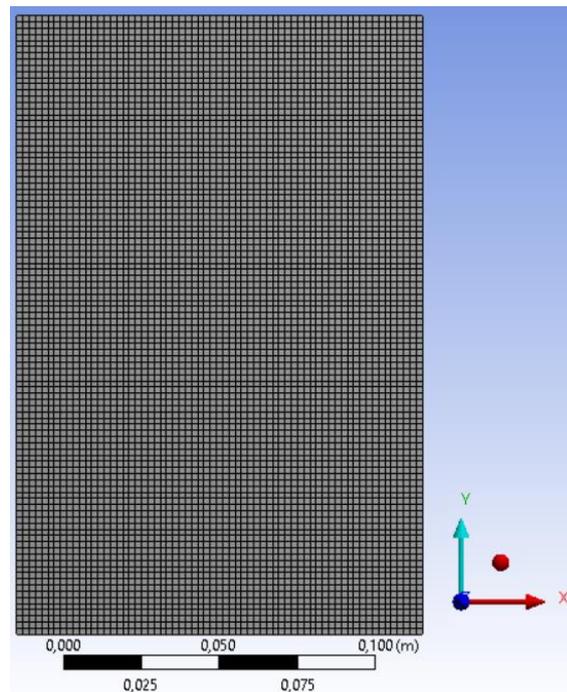


Fonte: Elaborado pelo autor

2.4.3.2. Elaboração da malha

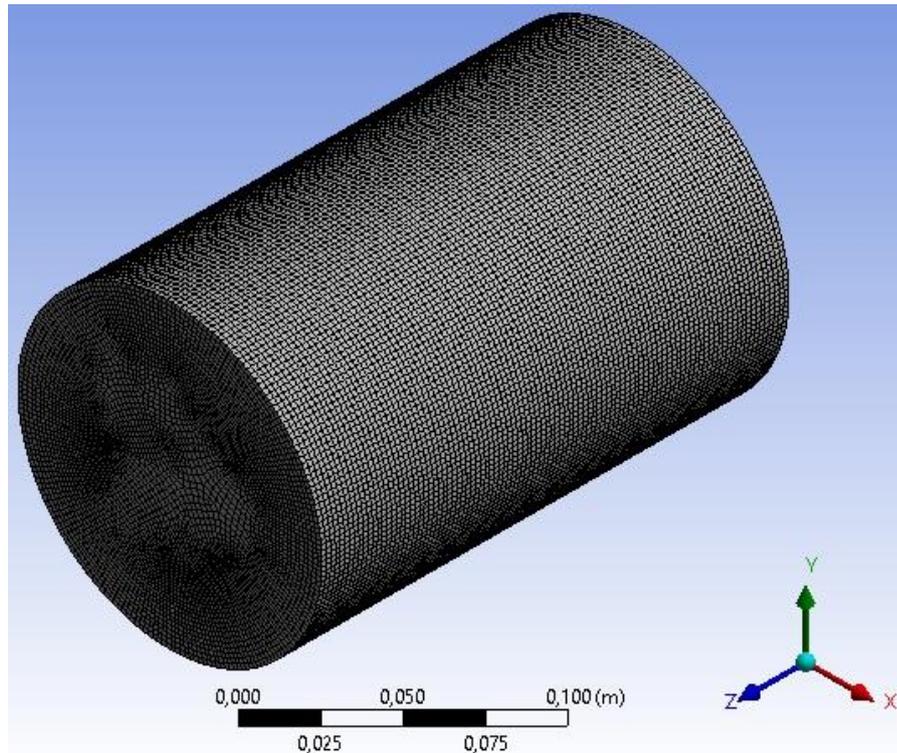
Para que a geometria desenhada possa ser inserida no ambiente de inserção das equações, é preciso elaborar a malha computacional no volume estudado. A malha da câmara de secagem bidimensional é apresentada na figura 7 e a malha da câmara de secagem tridimensional é apresentada na figura 8

Figura 7. Malha computacional bidimensional da câmara de secagem de Dias (2019)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 8. Malha computacional tridimensional da câmara de secagem de Dias (2019)



Fonte: Elaborado pelo autor

A malha bidimensional possui apenas volumes de controle em formato de quadrilátero com refinamento na entrada e saída de ar e nas paredes. Além disso, essa malha possui 6500 elementos referentes ao fluido (ar) e 6500 elementos referentes ao sólido (milho) com 52994 nós. O valor encontrado para a qualidade ortogonal mínima na malha estudada foi de 1,00 que de acordo com a classificação proposta pelo manual do *ANSYS Fluent* é excelente (ANSYS, 2018b).

A malha tridimensional possui os volumes de controle em formato de quadriláteros, além de refinamento na entrada e na saída de ar, e também nas paredes. Possui um total de 268.110 elementos para a célula de ar e 268.110 para a célula de milho e 2.738.038 nós. A qualidade ortogonal mínima foi igual a 0,577 que é classificado como muito bom (ANSYS, 2018b).

2.4.3.3. Teste de malha

O teste de malha é um procedimento que visa simular o programa proposto com diferentes tamanhos de malha, para que seja possível verificar se existem distorções em relação a malha. A verificação ocorre comparando uma determinada variável, em um ponto em comum das malhas selecionadas para o estudo. O teste foi o da malha bidimensional e, para isso, foram

elaboradas três malhas, sendo a primeira (malha 1), a que foi apresentada na seção anterior, a segunda malha (malha 2) com 7140 elementos referentes ao fluido e 7140 elementos referentes ao sólido e 58.162 nós e a terceira malha (malha 3) com 40.587 elementos referentes ao fluido e 40.587 elementos referentes ao sólido e 327.172 nós. Além disso, também foi comparado essas três com a malha tridimensional, que também foi apresentada na seção anterior.

A comparação do teor de umidade médio para as quatro malhas citadas no parágrafo é apresentada na tabela 6, para as medições a cada 10 min com o tempo total de 120 min. Foram usadas as condições iniciais e de contorno do experimento 1 de Dias (2019), para realizar o teste de malha.

Tabela 6. Teste de malha utilizando o teor de umidade médio do experimento 1 de Dias (2019) para quatro diferentes malhas

Tempo	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha Tridimensional
0min	0,22	0,22	0,22	0,22
10min	0,210827	0,210881	0,210827	0,210790
20min	0,204384	0,204426	0,204373	0,204340
30min	0,199331	0,199362	0,199312	0,199280
40min	0,195085	0,195108	0,195060	0,195028
50min	0,191383	0,191399	0,191352	0,191321
60min	0,188078	0,188089	0,188044	0,188013
70min	0,185082	0,185087	0,185044	0,185013
80min	0,182332	0,182333	0,182291	0,182261
90min	0,179786	0,179784	0,179743	0,179714
100min	0,177412	0,177407	0,177368	0,177338
110min	0,175186	0,175178	0,175140	0,175111
120min	0,173088	0,173077	0,173040	0,173011

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da tabela 6 apresentada, pode-se concluir que não existe distorções nas malhas estudadas, uma vez que os valores do teor de umidade médio são próximos. A malha escolhida para prosseguir no estudo foi a malha 1, que é a malha apresenta na seção 3.4.3.2., uma vez que apresenta menor tempo de processamento que as demais e com a mesma qualidade. O menor tempo de processamento é devido a quantidade de elementos e nós que a malha 1 possui. Outro fator que corrobora para a utilização da malha 1 são as diferenças apresentadas entre os valores das temperaturas das três malhas estudadas, que são pouco significativas

2.4.3.4. Implementação das equações no ANSYS Fluent

O modelo k-epsilon realizable apresenta duas novas equações para a construção do modelo matemático anteriormente apresentado, que são a energia cinética turbulenta (k) e a dissipação da energia cinética turbulenta (ε), onde o software *ANSYS Fluent* calcula automaticamente esses valores na área de Inicialização. Os valores de k e ε para os seis experimentos são apresentados na tabela 7. Vale ressaltar que o modelo apresentado por Tolentino (2018) trata de escoamento laminar, não necessitando a utilização de um modelo turbulento.

Tabela 7. Valores de Energia Cinética Turbulenta (k) e a Dissipação da Energia Cinética Turbulenta (ε) para cada experimento

Experimentos	Experimentos 1, 3 e 5 ($v = 0,8\text{m/s}$)	Experimentos 2, 4 e 6 ($v = 1,3\text{m/s}$)
Energia Cinética Turbulenta (m^2/s^2)	0,0027	0,0063
Dissipação da Energia Cinética Turbulenta (m^2/s^2)	0,0025	0,0090

Fonte: Elaborado pelo autor

A intensidade turbulenta (I) é outro fator que deve ser calculado para a composição do modelo matemático, e é calculada conforme a equação (56) (ANSYS, 2018c).

$$I = 0,16 * \left(Re^{\left(-\frac{1}{8}\right)} \right) * 100\% \quad (56)$$

Os valores de I dependem exclusivamente do número de Reynolds (Re) que, por sua vez, depende apenas da velocidade, uma vez que as outras variáveis não se alteram independentemente do experimento analisado. Para a velocidade de $0,8 \text{ m.s}^{-1}$, o valor de I é 5,3% e para a velocidade $1,3 \text{ m.s}^{-1}$, o valor de I é 5,0%.

Na tabela 8 é apresentada cada ação realizada para implementação do modelo matemático bidimensional no ambiente do software, o comando necessário para essa ação e quais equações são inseridas a partir de cada ação.

Tabela 8. Passo-a-Passo da Implementação do Modelo Matemático no software *Ansys Fluent*.

Etapa	Ação	Comando	Equações Inseridas
1	Rodar a malha desenvolvida	<i>File – Read – Mesh</i>	-
2	Ativar a UDF	<i>Parameters & Customization – User Defined Functions – Interpreted</i>	-
3	Habilitar as UDM's e a UDS	<i>Parameters & Customization – User Defined Memory; Parameters & Customization – User Defined Scalars</i>	-
4	Definir as macros principais	<i>User Defined Functions – Function Hooks – Initialization and Adjust</i>	20, 21, 22, 23, 24, 25 e 29
5	Habilitar o regime transiente	<i>Setup – Time – Transient</i>	
6	Definir a gravidade como - $9,8\text{m.s}^{-1}$	<i>Setup – Gravitational Acceleration</i>	
7	Ativar a equação da energia	<i>Setup – Models – Energy – ON</i>	11, 26
8	Ativar o modelo turbulento	<i>Setup – Models – Viscous Model – k-epsilon – Realizable</i>	-
9	Definição das propriedades do ar	<i>Setup – Materials – Air</i>	10, 15, 16, 17, 18 e 19
10	Definição das propriedades do milho	<i>Setup – Materials – Corn</i>	30, 32 e 33
11	Habilitar a Zona Porosa	<i>Setup – Cell Zone Conditions – Source Terms – Fluid Porosity; Thermal Model (Non-Equilibrium); Heat Transfer Coefficient</i>	6, 7, 14 e 31
12	Habilitar os Termos Fonte	<i>Ar: User Scalar 0 – 1</i>	9
		<i>Corn: Energy 0 – 1</i>	28
13	Inserção das condições iniciais e de contorno	<i>Setup – Boundary Conditions</i>	-
14	Definição dos controles de solução, incluindo discretização dos métodos, fatores de relaxamento	<i>Solutions – Methods; Controls</i>	-
15	Inicialização da solução	<i>Solutions – Initialization</i>	34, 35
16	Definição do tamanho do tempo, número de etapas de tempo; quantidade de iterações por tempo	<i>Solutions – Run Calculation</i>	-

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com Tolentino (2018), o software *ANSYS Fluent* possui uma limitação no cálculo do calor específico através da macro `DEFINE_SPECIFIC_HEAT` (no apêndice A estão contidas mais informações), onde não é possível calcular o calor específico para o ar úmido ($c_a + c_v w$) e o calor específico para o milho ($c_g + c_w M$) em função de w e M . Foram encontradas as curvas de w e M em função do tempo para cada um dos seis experimentos de secagem de Dias (2019) e, em seguida, foi feito um ajuste polinomial dos valores de w e M ao longo de todo o leito de grãos para todo o tempo de secagem. Onde as equações (57) e (58) são os ajustes polinomiais de w e M para o experimento 1, as eqs. (59) e (60) são os ajustes polinomiais de w e M para o experimento 2, as eqs. (61) e (62) são os ajustes polinomiais de w e M para o experimento 3, as eqs. (63) e (64) são os ajustes polinomiais de w e M para o experimento 4, as eqs. (65) e (66) são os ajustes polinomiais de w e M para o experimento 5 e as eqs. (67) e (68) são os ajustes polinomiais de w e M para o experimento 6.

$$\bar{w}(t_h) = 3,438 * 10^{-3} + 5,920 * 10^{-3} * t_h - 2,699 * 10^{-3} * t_h^2 + 5,772 * 10^{-4} * t_h^3 - 6,369 * 10^{-5} * t_h^4 + 3,506 * 10^{-6} * t_h^5 - 7,618 * 10^{-8} * t_h^6 \quad (57)$$

$$\bar{M}(t_h) = 2,243 * 10^{-1} - 6,851 * 10^{-3} * t_h + 2,298 * 10^{-4} * t_h^2 \quad (58)$$

$$\bar{w}(t_h) = 2,266 * 10^{-3} + 3,754 * 10^{-3} * t_h - 1,717 * 10^{-3} * t_h^2 + 3,678 * 10^{-4} * t_h^3 - 4,064 * 10^{-5} * t_h^4 + 2,239 * 10^{-6} * t_h^5 - 4,869 * 10^{-8} * t_h^6 \quad (59)$$

$$\bar{M}(t_h) = 2,292 * 10^{-1} - 7,276 * 10^{-3} * t_h + 2,516 * 10^{-4} * t_h^2 \quad (60)$$

$$\bar{w}(t_h) = 8,147 * 10^{-5} + 7,936 * 10^{-3} * t_h - 3,612 * 10^{-3} * t_h^2 + 7,712 * 10^{-4} * t_h^3 - 8,500 * 10^{-5} * t_h^4 + 4,676 * 10^{-6} * t_h^5 - 1,015 * 10^{-7} * t_h^6 \quad (61)$$

$$\bar{M}(t_h) = 2,260 * 10^{-1} - 8,942 * 10^{-3} * t_h + 2,995 * 10^{-4} * t_h^2 \quad (62)$$

$$\bar{w}(t_h) = 5,241 * 10^{-4} + 5,253 * 10^{-3} * t_h - 2,397 * 10^{-3} * t_h^2 + 5,128 * 10^{-4} * t_h^3 - 5,659 * 10^{-5} * t_h^4 + 3,115 * 10^{-6} * t_h^5 - 6,769 * 10^{-8} * t_h^6 \quad (63)$$

$$\bar{M}(t_h) = 2,271 * 10^{-1} - 9,751 * 10^{-3} * t_h + 3,373 * 10^{-4} * t_h^2 \quad (64)$$

$$\bar{w}(t_h) = -4,768 * 10^{-3} + 1,105 * 10^{-2} * t_h - 5,011 * 10^{-3} * t_h^2 + 1,067 * 10^{-3} * t_h^3 - 1,174 * 10^{-4} * t_h^4 + 6,452 * 10^{-6} * t_h^5 - 1,400 * 10^{-7} * t_h^6 \quad (65)$$

$$\bar{M}(t_h) = 2,338 * 10^{-1} - 1,210 * 10^{-2} * t_h + 4,038 * 10^{-4} * t_h^2 \quad (66)$$

$$\bar{w}(t_h) = -2,724 * 10^{-3} + 7,009 * 10^{-3} * t_h - 3,190 * 10^{-3} * t_h^2 + 6,809 * 10^{-4} * t_h^3 - 7,502 * 10^{-5} * t_h^4 + 4,126 * 10^{-6} * t_h^5 - 8,959 * 10^{-8} * t_h^6 \quad (67)$$

$$\bar{M}(t_h) = 2,293 * 10^{-1} - 1,270 * 10^{-2} * t_h + 4,418 * 10^{-4} * t_h^2 \quad (68)$$

onde:

t_h = tempo da simulação em horas;

2.5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados os resultados referentes a aplicação do modelo matemático no software *ANSYS Fluent*, além da validação desse modelo, onde os resultados numéricos foram confrontados com os dados experimentais da dissertação de Dias (2019).

2.5.1. Validação do Modelo Matemático

O procedimento de validação do modelo matemático ocorre com a utilização de parâmetros estatísticos. Tais parâmetros são utilizados para comparar os resultados numéricos com os dados experimentais e a sua utilização tem como objetivo validar o modelo matemático em questão. O coeficiente de determinação (R^2), a raiz do erro quadrático médio ($RMSE$) e o

percentual BIAS (*PBIAS*) foram os parâmetros estatísticos utilizados para a validação do modelo matemático de Tolentino (2018).

O R^2 é um critério de adequação para modelos, e pode variar entre 0 e 1, onde o valor próximo a 1 indica uma relação quase perfeita entre o modelo e os dados experimentais. A *RMSE* é utilizada para expressar a proximidade entre os dados experimentais e os resultados numéricos. Além disso apresenta valores de erro na mesma unidade da variável analisada. O *PBIAS* apresenta uma indicação sobre se o modelo subestima ou superestima quantidades, sendo que um *PBIAS* positivo significa que o modelo é subestimado, um *PBIAS* negativo significa que o modelo é superestimado e o *PBIAS* é igual a zero, significa que o modelo representa perfeitamente os dados experimentais. O R^2 , a *RMSE* e o *PBIAS* são calculados a partir das equações (69), (70) e (71):

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (\phi_{exp,i} - \bar{\phi}_{exp}) (\phi_{num,i} - \bar{\phi}_{num})\right)^2}{\sum_{i=1}^n (\phi_{exp,i} - \bar{\phi}_{exp})^2 \sum_{i=1}^n (\phi_{num,i} - \bar{\phi}_{num})^2} \quad (69)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\phi_{exp,i} - \phi_{num,i})^2 \right]^{1/2} \quad (70)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (\phi_{exp,i} - \phi_{num,i}) \times 100}{\sum_{i=1}^n (\phi_{exp,i})} \quad (71)$$

Onde $\phi_{exp,i}$ e $\phi_{num,i}$ são os valores dos parâmetros obtidos experimentalmente e numericamente em cada experimento, $\bar{\phi}_{exp}$ e $\bar{\phi}_{num}$ são as médias dos parâmetros obtidos experimentalmente e numericamente em cada experimento e n é o número total de valores comparados. Além disso, é importante determinar o erro de cada comparação entre os valores numéricos e experimentais. Para isso é utilizado o erro relativo percentual (*ER%*) que é definido pela Eq. (72).

$$ER_{\%} = \frac{|\phi_{exp,i} - \phi_{num,i}|}{\phi_{exp,i}} \cdot 100 \quad (72)$$

Outro parâmetro estatístico utilizado foi o erro absoluto representado pela equação (73)

$$EA = |\phi_{exp,i} - \phi_{num,i}| \quad (73)$$

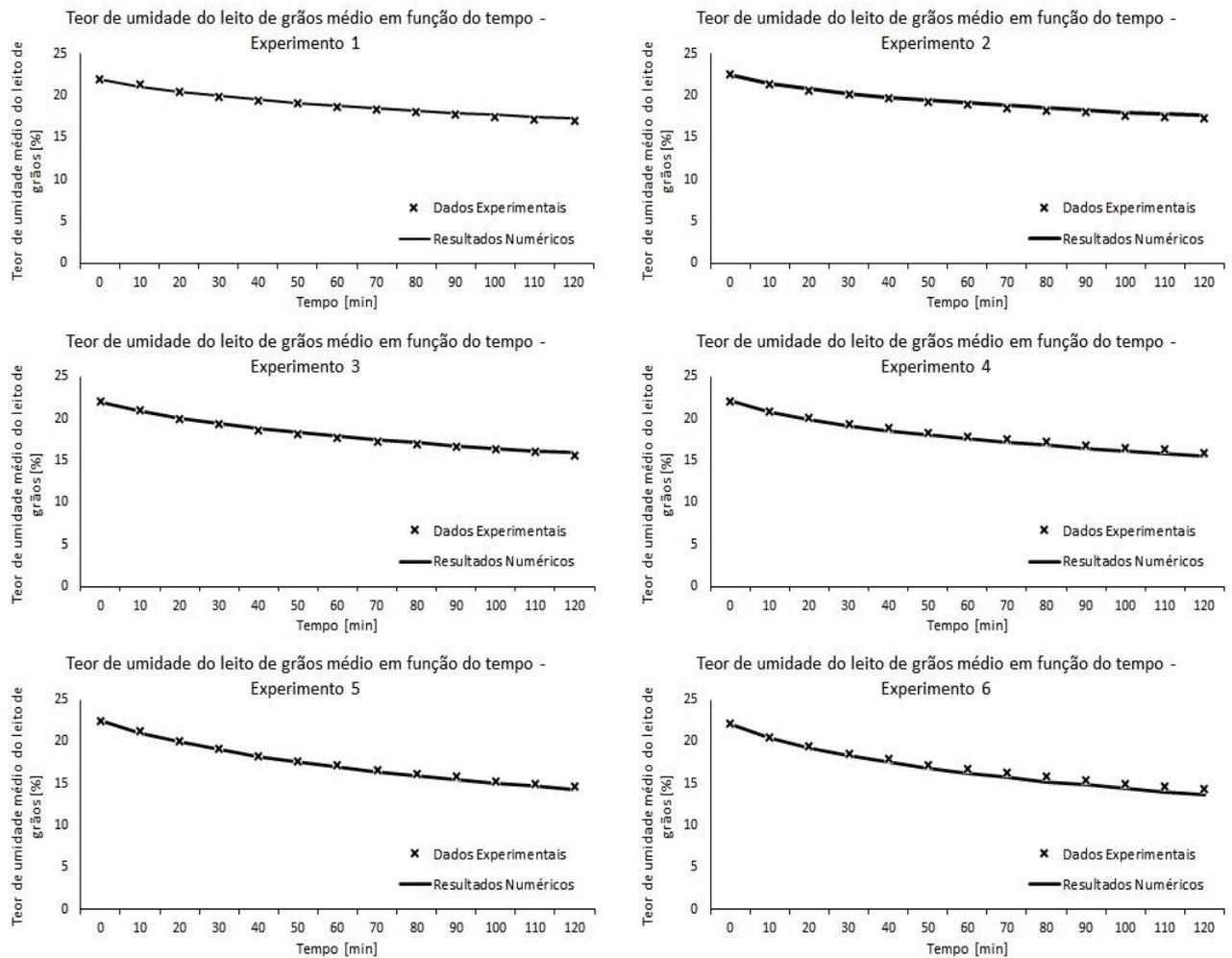
2.5.1.1. Confrontação dos dados experimentais de teor de umidade médio de Dias (2019) com os resultados numéricos – Geometria Bidimensional

Dias (2019) realizou seis experimentos de secagem em um secador a nível experimental em leito fixo. Os seis experimentos apresentam diferenças de velocidade e temperatura. Os experimento 1, 3 e 5 possuem velocidade igual a $0,8 \text{ m.s}^{-1}$ e os experimentos 2, 4 e 6 possuem velocidade igual a $1,3 \text{ m.s}^{-1}$. Os experimentos 1 e 2 possuem temperatura de entrada igual a 40°C , os experimentos 3 e 4 tem a temperatura de entrada igual a 50°C e os experimento 5 e 6 possuem a temperatura de entrada igual a 60°C .

A primeira confrontação foi feita entre os dados experimentais de teor de umidade médio de Dias (2019) com os resultados numéricos obtidos, sendo que nesse tópico foram utilizadas as equações apresentadas nos tópicos 3.1.2 e 3.1.3. As confrontações envolvendo as equações recentes da literatura serão apresentadas em tópicos posteriores.

Na figura 9 é apresentada a confrontação do teor de umidade médio em base seca entre os dados experimentais de Dias (2019) e a simulação numérica realizada em função do tempo.

Figura 9. Comparação do teor de umidade experimental em base seca e numérico em função do tempo para os seis experimentos de secagem



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da visualização dos gráficos, pode-se concluir que o modelo matemático consegue prever o fenômeno da secagem, uma vez que os visualmente os valores estão próximos e a tendência dos resultados numéricos é a mesma que os valores experimental.

Na tabela 9 são apresentados os parâmetros estatísticos calculados para cada experimento de secagem realizado por Dias (2019) utilizando a variável teor de umidade para comparação. O n que é referente ao número de medições, que foram no total de treze.

Tabela 9. Parâmetros Estatísticos (R^2 , SQR e RMSE) do teor de umidade para cada experimento de secagem do trabalho de Dias (2019)

Parâmetros estatísticos			
Experimento	R^2	RMSE (kg/kg)	PBIAS (%)
1	0,9978	0,0019	-0,6117
2	0,9988	0,0028	-1,3081
3	0,9990	0,0018	-0,8162
4	0,9991	0,0029	1,4402
5	0,9996	0,0019	0,9481
6	0,9997	0,0047	2,3868

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a tabela 9, pode-se observar que o Coeficiente de Determinação (R^2) para todos os seis testes é bem próximo de 1. Para a raiz do erro quadrático médio ($RMSE$) os valores estão bem próximos de zero, demonstrando que o erro é pouco significativo. No percentual BIAS ($PBIAS$) para os experimentos 1, 2 e 3 o modelo matemático é superestimado e para os experimentos 4, 5 e 6 o modelo matemático é subestimado, porém os valores estão bem próximos de zero, indicando a boa aproximação que o modelo matemático possui.

No apêndice B são mostrados os resultados numéricos comparando-os com os dados experimentais e mostrando o erro percentual relativo.

2.5.1.2. Confrontação dos resultados do teor de umidade obtidas experimentalmente por Dias (2019) com os resultados numéricos obtidos utilizando as equações recentes da literatura – Geometria Bidimensional

Com o modelo matemático implementado no Fluent por Tolentino (2018), o próximo passo é validar modelo matemático modificado neste trabalho para contemplar novas equações de propriedades do milho obtidas da literatura. Os parâmetros estatísticos R^2 (coeficiente de determinação), $RMSE$ (raiz do erro quadrático médio) e o $PBIAS$ foram utilizados para a validação, sendo a variável escolhida para a confrontação o teor de umidade médio.

Os parâmetros estatísticos para o modelo matemático com as equações apresentadas na seção 3.1.6. são apresentados nas tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10. Parâmetros estatísticos para o modelo matemático com a primeira equação do calor latente de vaporização da água para o leito de grãos de milho (eq. 48)

Parâmetros estatísticos			
Experimento	R²	RMSE (kg/kg)	PBIAS (%)
1	0,9976	0,0018	-0,4047
2	0,9988	0,0026	-1,1022
3	0,9990	0,0015	-0,5006
4	0,9991	0,0029	1,3251
5	0,9997	0,0025	1,1054
6	0,9997	0,0047	2,0438

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11. Parâmetros estatísticos para o modelo matemático com a segunda equação do calor latente de vaporização da água para o leito de grãos de milho (eq. 49)

Parâmetros estatísticos			
Experimento	R²	RMSE (kg/kg)	PBIAS (%)
1	0,9976	0,0020	-0,6870
2	0,9988	0,0028	-1,3187
3	0,9990	0,0019	-0,8567
4	0,9991	0,0026	1,3030
5	0,9997	0,0018	0,8974
6	0,9997	0,0042	2,1227

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 12. Parâmetros estatísticos para o modelo matemático com a equação do teor de umidade de equilíbrio para o milho (eq. 50)

Parâmetros estatísticos			
Experimento	R²	RMSE (kg/kg)	PBIAS (%)
1	0,9978	0,0018	-0,4416
2	0,9988	0,0025	-1,0592
3	0,9990	0,0015	-0,5005
4	0,9991	0,0031	1,3986
5	0,9997	0,0025	1,0819
6	0,9997	0,0048	2,1058

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos resultados apresentados nas tabelas anteriores, pode-se dizer que é possível substituir as novas equações no modelo matemático proposto, uma vez que os valores de R^2 estão próximos de 1 e os valores de $PBIAS$ e $RMSE$ estão próximos de zero.

2.5.1.3. Confrontação dos dados experimentais de teor de umidade médio de Dias (2019) com os resultados numéricos – Geometria Tridimensional

Assim como foi realizado uma validação do modelo matemático para geometria bidimensional, foi realizado a validação para o modelo tridimensional. O modelo matemático utilizado teve a substituição das equações utilizadas para o modelo bidimensional para as equações recentes da literatura apresentadas no tópico 3.1.6. A equação do calor latente de vaporização da água para o leito de grãos de milho foi substituída da eq. 29 para a eq. 47 e a equação do teor de umidade de equilíbrio para o milho foi substituída da eq. 23 para a eq. 48.

Para a validação do modelo matemático aplicado ao secador tridimensional foram usados os mesmos parâmetros estatísticos para o modelo bidimensional: o Coeficiente de Determinação (R^2), a raiz do erro quadrático médio ($RMSE$) e o $PBIAS$, apresentados na tabela 13. O teor de umidade encontrado na simulação foi confrontado com o teor de umidade dos seis experimentos de Dias (2019).

Tabela 13. Parâmetros estatísticos do teor de umidade para cada experimento de secagem do trabalho de Dias (2019) para o modelo tridimensional

Parâmetros estatísticos			
Experimento	R^2	RMSE (kg/kg)	PBIAS (%)
1	0,9978	0,0019	-0,5969
2	0,9988	0,0025	-1,1867
3	0,9989	0,0016	-0,6797
4	0,9991	0,0030	1,5103
5	0,9996	0,0023	1,1259
6	0,9997	0,0047	2,3702

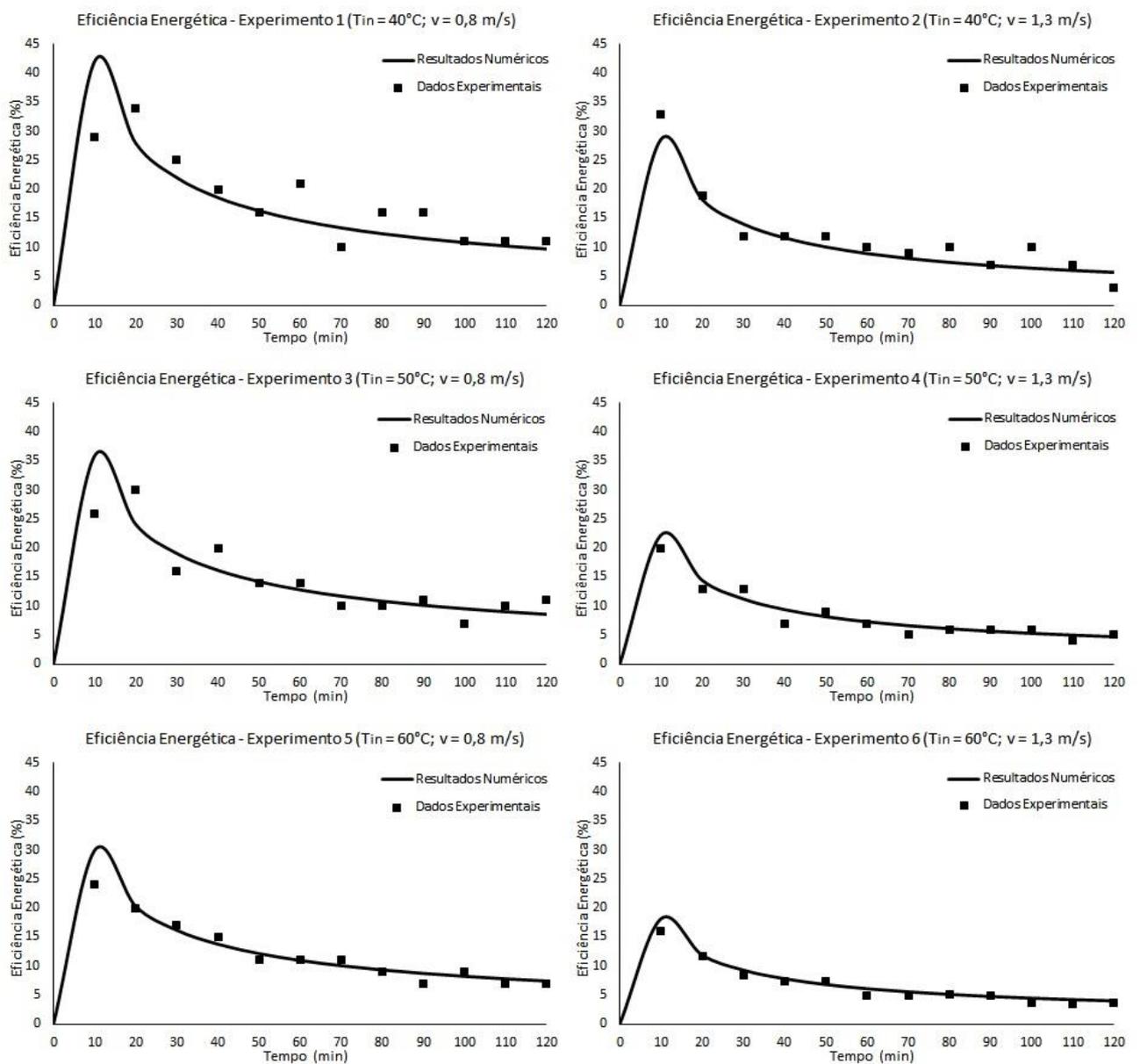
Fonte: Elaborado pelo autor

Os parâmetros estatísticos utilizados comprovaram que o modelo tridimensional também foi capaz de prever o processo de secagem, uma vez que o R^2 foi próximo de 1 para os seis experimentos e os valores de $RMSE$ e $PBIAS$ foram próximos de zero.

2.5.2. Análise Energética

Após a validação do modelo matemático, foi realizada também uma análise energética durante o tempo de simulação. Inicialmente, foram comparados os resultados numéricos com os dados experimentais de Dias (2019) para a eficiência energética. Na figura 10 é apresentada a comparação para os seis experimentos de secagem.

Figura 10. Confrontação dos resultados numéricos com os dados experimentais da literatura



Fonte: Elaborado pelo autor

As curvas dos resultados numéricos apresentam uma boa concordância com os dados experimentais, porém são observadas algumas diferenças. O parâmetro estatístico, erro absoluto, foi utilizado para identificar onde estão localizadas as maiores diferenças. Em metade dos experimentos, os maiores erros absolutos estão no início de cada experimento. Para o experimento 1, os maiores erros absolutos são de 11,8 e 6,0 nos tempos de 10min e 20min. Já para o experimento 2, o maior erro absoluto, que é igual a 5,1, está localizado no tempo de 10min. No experimento 3, o maior erro absoluto é de 7,7 no tempo de 10min. Para os experimentos 4, 5 e 6 os maiores erros absolutos são 3,1 no tempo de 40min (exp. 4), 2,5 no tempo de 20min (exp. 5) e 1,8 no tempo de 60min (exp. 6).

Dias (2019) afirma que velocidades e temperaturas menores apresentaram dificuldades de se manter constantes ao longo do tempo no secador utilizado para realizar os experimentos. Essa dificuldade de manter esses dois parâmetros constante é mais acentuada no início do experimento, o que é comprovado observando os gráficos dos experimentos 1, 2 e 3. Porém, vale ressaltar que para o experimento 2, apenas o início do experimento há uma diferença considerável entre o resultado numérico e o dado experimental. Para os outros tempos, os erros absolutos são menores que 2,2, isso porque a velocidade do experimento 2 ($v=1,3 \text{ m.s}^{-1}$) é maior que a velocidade dos experimentos 1 e 3 ($v=0,8 \text{ m.s}^{-1}$).

Para os experimentos 4, 5 e 6, o sistema atinge o regime permanente com mais facilidade, por causa dos parâmetros de secagem: velocidade e temperatura, isso porque os experimentos 4 e 6 possuem uma velocidade mais elevada ($v=1,3 \text{ m.s}^{-1}$) e o experimento 5 é o que possui a maior temperatura na entrada do secador ($T_{in}=60^{\circ}\text{C}$).

Os mesmos parâmetros estatísticos utilizados na comparação do teor de umidade médio, foram utilizados para a eficiência energética e a tabela 14 apresenta esses parâmetros.

Tabela 14. Parâmetros estatísticos da eficiência energética para cada experimento de secagem do trabalho de Dias (2019)

Parâmetros estatísticos			
Experimento	R²	RMSE (%)	PBIAS (%)
1 (T _{in} = 40°C; v = 0,8 m/s)	0,7213	4,5439	4,5273
2 (T _{in} = 40°C; v = 1,3 m/s)	0,9702	1,9196	8,0264
3 (T _{in} = 50°C; v = 0,8 m/s)	0,8094	3,1015	-2,1279
4 (T _{in} = 50°C; v = 1,3 m/s)	0,9782	1,3672	-5,4059
5 (T _{in} = 60°C; v = 0,8 m/s)	0,9513	1,2412	-4,4655
6 (T _{in} = 60°C; v = 1,3 m/s)	0,9942	0,8733	-8,8023

Fonte: Elaborado pelo autor

Observando a tabela 14 percebe-se que os valores do coeficiente de determinação (R^2) são maiores para os experimentos com a velocidade maior (experimentos 2, 4 e 6, que possuem velocidade de 1,3 m.s⁻¹) e menores para os experimentos com velocidade menor (experimentos 1, 3 e 5, que possuem velocidade de 0,8 m.s⁻¹). Esse fato acontece pela dificuldade do equipamento de secagem em manter a velocidade menor constante ao longo do tempo. Os valores da raiz do erro quadrático médio ($RMSE$) são pouco significativas e ao comparar os experimentos de mesma temperatura, percebe-se que as $RMSE$ de maiores velocidade são menores que as $RMSE$ de menores velocidades, que também é justificado pela regulação de velocidade sem mais difícil em velocidades menores. Por fim em relação ao $PBIAS$, percebe-se que os resultados numéricos dos experimentos 1 e 2 estão superestimados em relação aos dados experimentais, enquanto os resultados numéricos dos experimentos 3, 4, 5 e 6 estão subestimados em relação aos dados experimentais.

Outros dois fatores também justificam as diferenças entre os dados experimentais e os resultados numéricos:

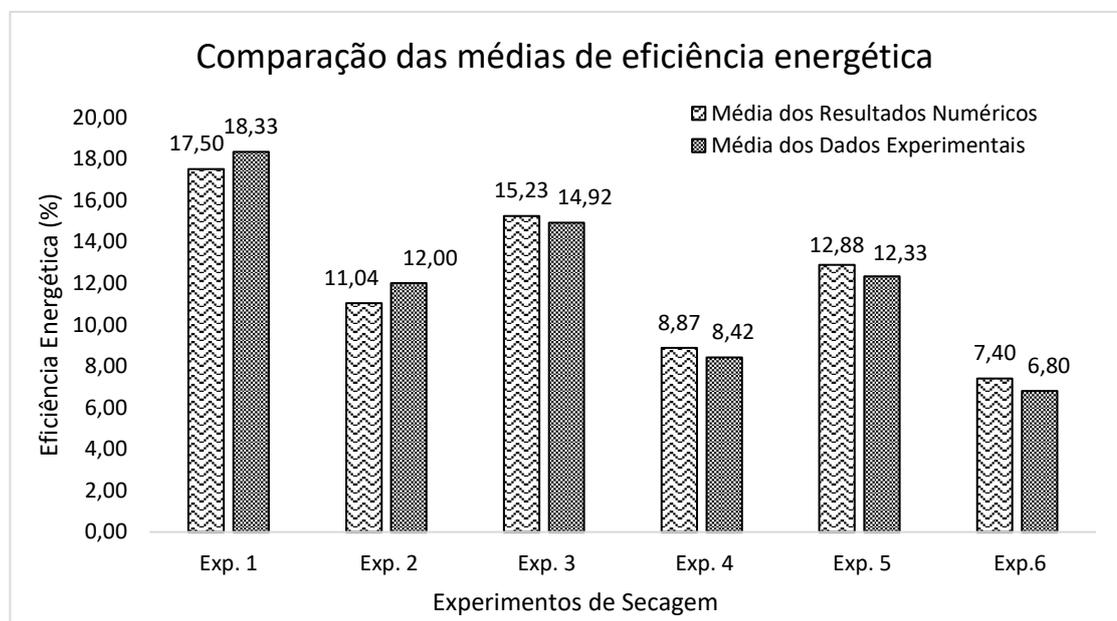
- As temperaturas de entrada do secador e a temperatura ambiente utilizadas no software *ANSYS Fluent* são constantes, porém nos experimentos elas são medidas a cada 10 minutos e seus valores se alteram.
- No secador experimental, as medições de temperatura foram feitas em 4 pontos localizados em diferentes alturas (45mm, 90mm, 135mm, 180mm) e em seguida foi calculado a média aritmética com essas 4 temperaturas para finalmente obter a temperatura do leito de grãos. Com esse procedimento, podem haver distorções no valor final da temperatura em comparação com o resultado numérico. Caso, a temperatura fosse medida em mais pontos, esperaria que os valores de eficiência

energética dos dados experimentais e dos resultados numéricos seriam mais próximos.

É importante ressaltar que nenhum trabalho presente na literatura apresenta uma comparação entre os resultados numéricos e os dados experimentais de eficiência energética.

Na figura 11 é apresentada a comparação das médias da eficiência energética, para demonstrar a proximidade entre os dados experimentais e os resultados numéricos.

Figura 11. Comparação entre as médias da eficiência energética dos resultados numéricos e dos dados experimentais



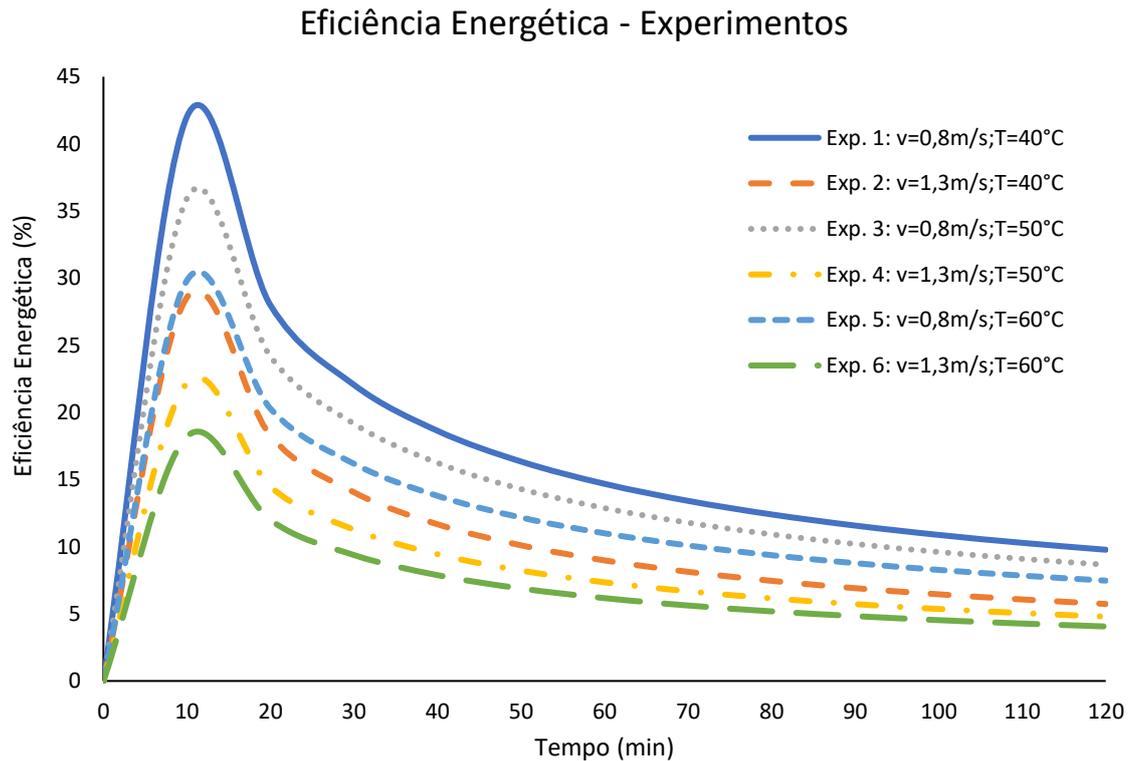
Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar a figura 11, é possível observar semelhanças entre os resultados numéricos e os dados experimentais. A maior média de eficiência energética foi obtida para o experimento 1 e a menor média para o experimento 6. Além disso, ao comparar os valores, percebe-se que a maior diferença entre as médias foi encontrada no experimento 2, que é 1% e a menor diferença entre as médias é do experimento 3, que é 0,32%, observa-se que essas diferenças são pouco significativas. No apêndice B são apresentados os resultados numéricos da eficiência energética para cada experimento.

Realizada a confrontação entre os dados experimentais e os resultados numéricos, a próxima análise é focada apenas nos resultados numéricos, com o intuito de estudar o

comportamento da eficiência energética ao longo do tempo, em função das variações de temperatura e velocidade. Na figura 12 é apresentada a comparação das eficiências energéticas ao longo do tempo de secagem para cada experimento.

Figura 12. Eficiência energética dos experimentos ao longo do tempo de secagem



Fonte: Elaborado pelo autor

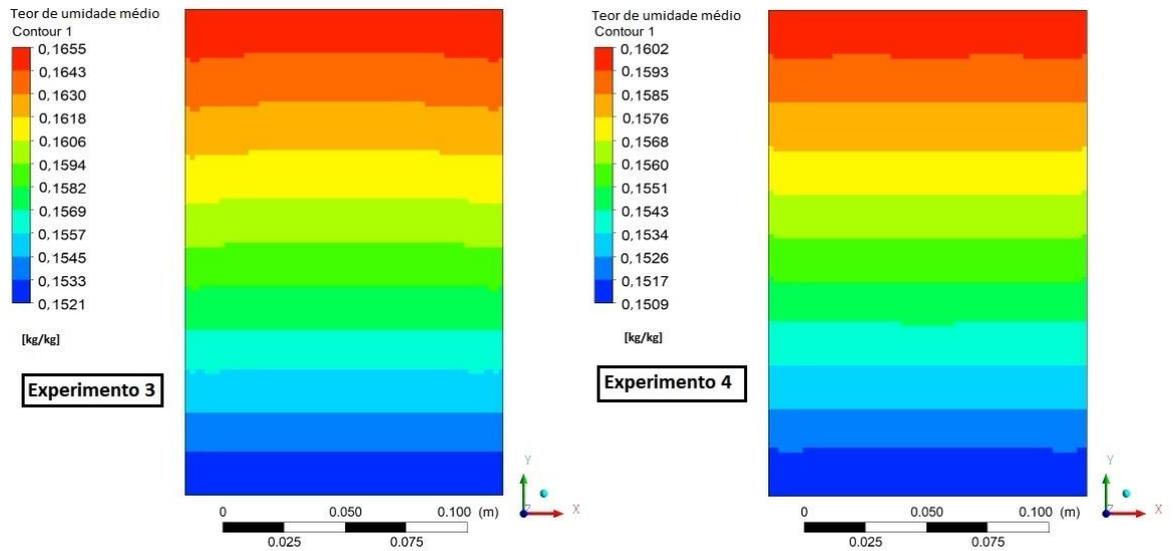
Um comportamento, que pode ser observado na figura 12 é o pico dos valores de eficiências energética no início do fenômeno da secagem, devido às elevadas taxas de secagem, uma vez que a umidade superficial dos grãos é facilmente removida pelo fenômeno da evaporação. Após atingir o pico, as eficiências passam a diminuir devido à queda da taxa de secagem, decorrente do fim da umidade superficial e do início da remoção da umidade intersticial. Além do mais, a não utilização da energia para remoção de umidade ocasiona uma grande exaustão para fora do secador de ar aquecido não aproveitado que possui um grande potencial energético. O comportamento apresentado também foi demonstrado nos trabalhos de Ranjbaran *et al.* (2014), Tolentino (2018) e Dias (2019).

A velocidade de secagem está intimamente ligada a vazão mássica, ou seja, quanto maior a velocidade na entrada do secador, maior será sua vazão mássica. Analisando o gráfico pode se perceber que menores vazões mássicas de ar produziram eficiências energéticas maiores. Porém é importante ressaltar que menores vazões mássicas demoram mais para secar os grãos. Ao aplicar uma vazão mássica elevada ao leito, os grãos tem um tempo menor para consumir a energia proveniente do ar de secagem para evaporar a umidade. Logo uma maior quantidade de energia saiu da câmara de secagem sem aproveitamento, por isso que se obtém menores valores de eficiência com maior vazões mássicas.

Para a temperatura de entrada (T_{in}) igual a 40°C , o aumento de velocidade de $0,8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para $1,3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ resultou em uma diminuição média de aproximadamente 37% da eficiência energética. Já para T_{in} igual a 50°C , o aumento da velocidade resultou em uma diminuição média de aproximadamente 42% para a eficiência energética. Por fim, com $T_{in} = 60^{\circ}\text{C}$, o aumento da velocidade proporcionou uma redução média de 43% para a eficiência energética. Pode se concluir que o aumento da velocidade reduz drasticamente os valores de eficiência energética.

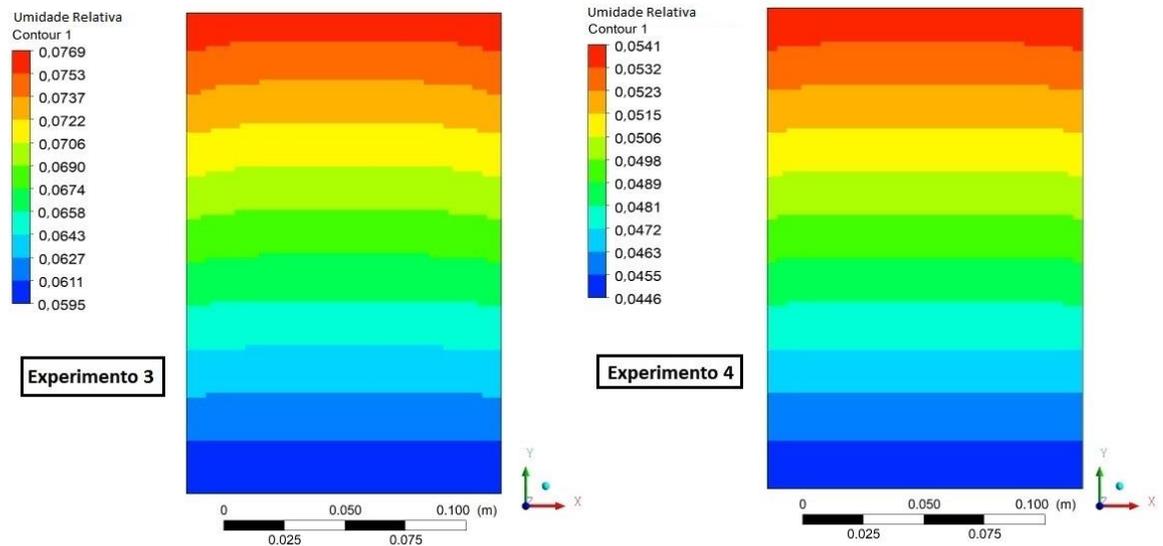
Porém é importante ressaltar que apesar de menores velocidades de ar na entrada do secador obterem maiores eficiências energéticas, as regiões distantes da entrada do secador apresentam teores de umidade do leito de grãos e umidade relativa do ar intergranular maiores. As figuras 13 e 14 apresentam as isolinhas da variação do teor de umidade da variação da umidade relativa ao longo do secador dos experimentos 3 e 4, que foram selecionados para demonstrar o fenômeno descrito no início parágrafo, uma vez que possuem o mesmo teor de umidade inicial.

Figura 13. Variação do teor de umidade ao longo do secador para os experimentos 3 e 4 – Tempo: 7200s (final da secagem)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 14. Variação da umidade relativa ao longo do secador para os experimentos 3 e 4 – Tempo: 7200s (final da secagem)



Fonte: Elaborado pelo autor

As figuras apresentadas descrevem o comportamento anteriormente citado, que para menores velocidades de ar de secagem maiores serão os valores de teor de umidade e umidade relativa nas camadas finais do leito de grãos. De acordo com Tolentino (2018), essa condição

pode levar uma degradação da qualidade dos grãos, pois um maior percentual de umidade gera uma maior atividade metabólica e conseqüentemente gerando mofo.

Para os experimentos com velocidade igual a $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, observou que quanto maior a temperatura, menor a eficiência energética, que está relacionado com a maior perda de energia pela exaustão de gases com alta capacidade energética.

Ao comparar os experimentos com velocidade igual a $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, o aumento da temperatura de entrada de 40°C para 50°C gerou uma redução média de 7% da eficiência energética e o aumento da temperatura de entrada de 50°C para 60°C resultou em uma redução média de 13%. Comparando os experimentos com velocidade igual a $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, o aumento da temperatura de entrada de 40°C para 50°C gerou em aumento médio de 18% da eficiência energética e o aumento da temperatura de entrada de 50°C para 60°C resultou em um aumento médio de 10%.

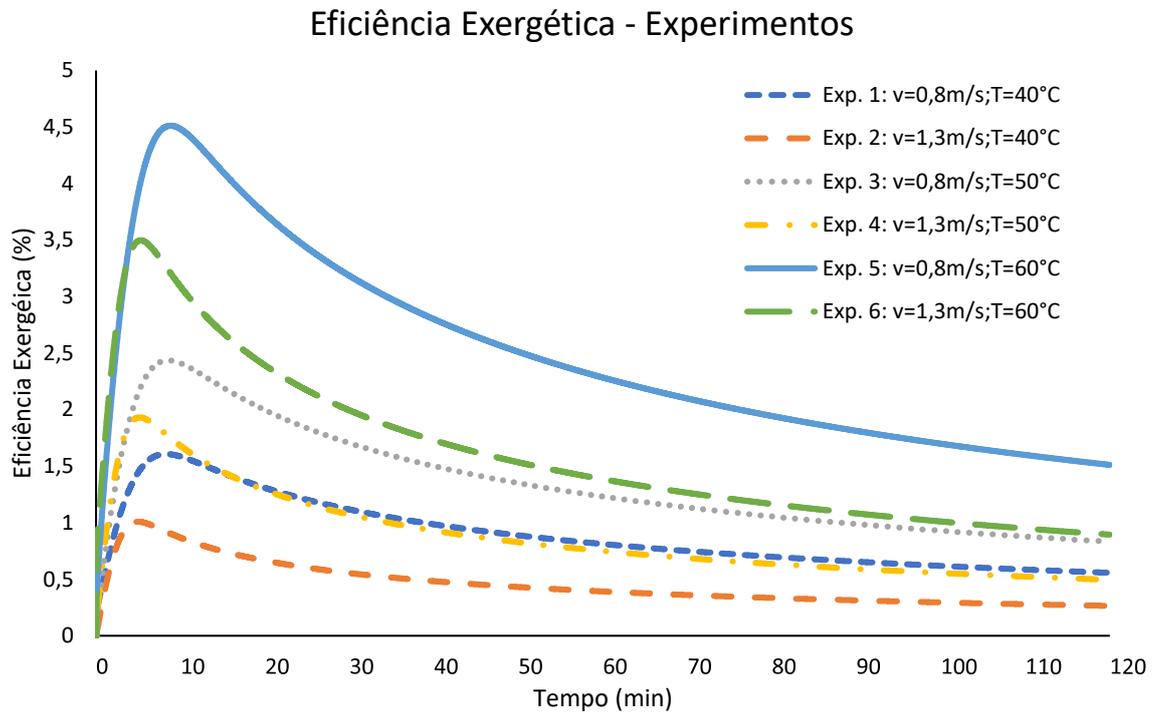
2.5.3. Análise Exergética

Para a eficiência exergética, a metodologia utilizada neste presente trabalho consiste em um somatório das exergias demandadas para cada um dos volumes de controle resultando na exergia demandada total para evaporar os grãos. Já a exergia que entra no sistema depende das temperaturas do sistema, dos calores específicos, da vazão mássica, da pressão atmosférica e da umidade absoluta. Sendo que essas variáveis que constituem o cálculo das eficiência exergética são obtidas por meio do software *ANSYS Fluent*.

Já a metodologia utilizada por Dias (2019) foi composta por diversas medições para se obter os valores das eficiências exergética, e a medição da exergia que entra no secador contempla o secador por inteiro. Logo, a eficiência exergética está relacionada tanto ao secador quanto ao processo de secagem em si, impossibilitando de se realizar uma confrontação entre os dados experimentais e os resultados numéricos.

Logo foi realizado uma análise exergética em torno apenas dos resultados numéricos, com o intuito de estudar o comportamento da eficiência exergética ao longo do tempo com as variações de temperatura e velocidade. A comparação das eficiências exergéticas ao longo do tempo de secagem para cada experimento é apresentada na figura 15.

Figura 15. Eficiência exergética dos experimentos ao longo do tempo de secagem



Fonte: Elaborado pelo autor

O mesmo comportamento observado na eficiência energética, também foi observado na eficiência exergética, que é o pico dos valores de eficiência no início do fenômeno da secagem devido às elevadas taxas de secagem. Após alcançar o pico, as eficiências passam a reduzir devido à diminuição da taxa de secagem, decorrente do fim da umidade superficial e do início da remoção da umidade intersticial. O comportamento apresentado também foi demonstrado nos trabalhos de Ranjbaran *et al.* (2014), Tolentino (2018) e Dias (2019).

A maior média foi encontrada no experimento 5 com o valor de 2,47%, seguido dos experimentos 6 e 3 com médias de 1,54% e 1,33% respectivamente. Em seguida os experimentos 1 e 4, com médias de 0,88% e 0,84%, respectivamente. E a menor média ficou com o experimento 2 sendo seu valor igual a 0,44%.

Ao comparar experimentos de mesma temperatura e com velocidades diferentes, pode-se perceber o aumento de velocidade acarreta em uma redução da eficiência exergética. Para a temperatura de entrada (T_{in}) igual a 40°C, o aumento de velocidade de 0,8 m·s⁻¹ para 1,3 m·s⁻¹ resultou em uma diminuição média de 50%. Já para T_{in} igual a 50°C, o aumento da velocidade resultou em uma diminuição média de 37% da eficiência. Por fim, com $T_{in} = 60°C$, o aumento da velocidade proporcionou uma redução média de 38%. Conclui-se que o aumento da velocidade reduz drasticamente os valores de eficiência exergética.

Analisando a eficiência exergética de secagem para uma mesma velocidade, um aumento de temperatura representa maiores eficiências, isto se deve ao termo de Carnot $\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$ que faz parte do numerador da definição de eficiência exergética. Com o aumento da temperatura de entrada, o termo de Carnot se torna maior elevando a eficiência exergética. Esse comportamento também é observado nos trabalhos de Tolentino (2018) e Dias (2019).

Comparando os experimentos com velocidade igual a $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, o aumento da temperatura de entrada de 40°C para 50°C gerou aumento médio de 52% da eficiência exergética e o aumento da temperatura de entrada de 50°C para 60°C resultou em uma aumento médio de 85% da eficiência exergética. Comparando os experimentos com velocidade igual a $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, o aumento da temperatura de entrada de 40°C para 50°C gerou em aumento médio de 92% da eficiência energética e o aumento da temperatura de entrada de 50°C para 60°C resultou em um aumento médio de 87%. Ao variar os valores de temperatura, os aumentos de eficiência exergética são muito mais significativos que as reduções de eficiência energética, analisadas na sessão anterior.

Diante disso é possível afirmar que os resultados numéricos encontrados foram capazes de realizar uma correta interpretação das análises exergética do processo de secagem.

3. CONCLUSÃO

Este presente trabalho realizou um estudo do fenômeno da secagem utilizando o modelo matemático de secagem de grãos de milho em leito fixo e camada espessa, elaborado por Tolentino (2018). Por meio do software *ANSYS Fluent* e com o auxílio da ferramenta *User-Defined Function* foi possível solucionar o modelo matemático proposto para o escoamento bidimensional e tridimensional. O secador estudado foi elaborado por Dias (2019) e possui um leito cilíndrico de 130mm de diâmetro e 200mm de altura, onde foram realizados 6 experimentos de secagem, utilizando as temperaturas 40°C, 50°C e 60°C, e as velocidades 0,8 e 1,3 m.s⁻¹ para o ar de secagem.

A validação do modelo matemático ocorreu através de 3 parâmetros estatísticos: o coeficiente de determinação, a raiz do erro quadrático médio e o percentual BIAS. Para todos os 6 experimentos, os parâmetros estatísticos demonstraram a excelente concordância entre os resultados numéricos com os dados experimentais da literatura, tanto para a geometria bidimensional quanto para a geometria tridimensional. Sendo a variável analisada, o teor de umidade, o menor valor encontrado para R^2 foi de 0,9978, para o *RMSE* o maior valor encontrado foi de 0,0047 e o *PBIAS*, o valor mais distante do zero foi de 2,3868.

Além disso, foram implementadas três novas equações de propriedades do milho no modelo matemático e ao utilizá-las, também apresentaram excelente concordância entre os resultados numéricos e os dados experimentais da literatura. A eficiência energética obtida com os resultados numéricos da solução do modelo matemático de secagem em leito fixo de grãos, também foi comparada com os dados experimentais da literatura e demonstraram boa concordância.

Também, foi feita uma análise energética e exergética, obtendo as eficiências. Para a eficiência energética, o maior valor foi do experimento 1 ($T_{in} = 40^{\circ}C; v = 0,8 m/s$) com 17,50% e o menor valor foi do experimento 6 ($T_{in} = 60^{\circ}C; v = 1,3 m/s$) com 7,42%. Já para a eficiência exergética, o maior valor foi de 2,47% e representa o experimento 5 ($T_{in} = 60^{\circ}C; v = 0,8 m/s$). E o menor valor foi do experimento 2 ($T_{in} = 40^{\circ}C; v = 1,3 m/s$), com a eficiência exergética igual a 0,44%.

Como trabalho futuro, uma sugestão é utilizar o modelo matemático dessa dissertação alterando as equações das propriedades, do teor de umidade do leito em camada fina, do teor de umidade de equilíbrio de outros produtos agrícolas, como por exemplo: arroz, soja, trigo e feijão.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGHBASHLO, Mortaza *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, Ednilton Tavares de *et al.* Determinação de propriedades térmicas de grãos de milho. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 3, p. 488-498, 2004.
- ANSYS Fluent UDF Manual 18.0. Canonsburg: ANSYS Inc., 2018. (b)
- ANSYS Fluent User's Guide 18.0. Canonsburg: ANSYS Inc., 2018. (c)
- 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.
- BARKER, J. Heat transfer in packed beds. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 57, n. 4, p. 43-51, 1956.
- BEIGI, Mohsen; TOHIDI, Mojtaba; TORKI-HARCHEGANI, Mehdi. Exergetic analysis of deep-bed drying of rough rice in a convective dryer. **Energy**, v. 140, p. 374-382, 2017.
- BEJAN. A.; DINCER, I.; LORENTE, S.; MIGUEL, A.; REIS, H. **Porous and complex flow structures in modern technologies**. Nova Iorque: Springer, 2004. 408 p.
- BEJAN, A. **Advanced engineering thermodynamics**. 3th ed. Hoboken: John Wiley e Sons Inc., 2006. 880 p
- BEJAN, A. **Convection heat transfer**. 4.ed. Nova 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.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**. Westport: The AVI Publishing Company Inc., 1974. 265 p.
- CASTRO, María *et al.* Exergy analyses of onion drying by convection: influence of dryer parameters on performance. **Entropy**, v. 20, n. 5, p. 310, 2018.
- ÇELİK, Emel; PARLAK, Nezaket; ÇAY, Yusuf. Experimental and numerical study on drying behavior of CORN grain. **Heat and Mass Transfer**, v. 57, n. 2, p. 321-332, 2021.
- CHAVAN, Anand; VITANKAR, Vivek; THORAT, Bhaskar. CFD modeling and experimental study of solar conduction dryer. **Drying Technology**, v. 39, n. 8, p. 1087-1100, 2021.
- CHEN, Chiachung; WU, Po-Ching. Thin-layer drying model for rough rice with high moisture content. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 80, n. 1, p. 45-52, 2001.

- CHILKA, Amarvir G.; RANADE, Vivek V. Drying of almonds I: Single particle. **Indian Chemical Engineer**, v. 60, n. 3, p. 232-254, 2018.
- DA SILVA, Gisele Mol *et al.* Energy and exergy analysis of the drying of corn grains. **Renewable Energy**, v. 163, p. 1942-1950, 2021.
- DELGADO-PLAZA, Emérita *et al.* Estimation of the Energy Consumption of the Rice and Corn Drying Process in the Equatorial Zone. **Applied Sciences**, v. 10, n. 21, p. 7497, 2020.
- DIAMANTE, Lemuel M. *et al.* A new mathematical model for thin layer drying of fruits. **International journal of food science & technology**, v. 45, n. 9, p. 1956-1962, 2010.
- DIAS, A. A. **Projeto e Análise Experimental de um Secador de Grãos de Leite Fixo em Escala Laboratorial**. 245 f. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: CEFET-MG, 2019.
- 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.
- DONG, Ruiting *et al.* 3-D CFD simulation of oil shale drying in fluidized bed and experimental verification. **Oil Shale**, v. 37, n. 4, 2020.
- DOS SANTOS, S. G. F. *et al.* Adsorption isotherms and vaporization latent heat of corn. **Científica (Jaboticabal)**, v. 48, n. 1, p. 17-24, 2020.
- ELGAMAL, Ramadan A.; KISHK, Sameh S.; ELMASRY, Gamal M. Validation of CFD models for the deep-bed drying of rice using thermal imaging. **biosystems engineering**, v. 161, p. 135-144, 2017.
- EMBRAPA. *Sistema de Produção: Cultivo do Milho*, (Versão Eletrônica). 9.ed. 2015. Disponível em: < <https://w.spo.cnptia.embrapa.br/>>. Acesso em: 15 dez. 2019.
- EP, Banuu Priya *et al.* Thin layer and deep bed drying basic theories and modelling: a review. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 18, n. 1, p. 314-325, 2016.
- ERBAY Z., HEPBASLI A., Advanced Exergy Analysis of a Heat Pump Drying System Used in Food Drying. **Drying Technology**, v 31, 802-810, 2013.
- 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.
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2019. The State of Food Security and Nutrition in the World 2019. **Safeguarding against economic slowdowns and downturns**. Rome, FAO. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- FORTES, M.; FERREIRA, D. A.; FERREIRA, W. R.; SOUZA, A. C. **Modelagem de um condicionador de ar de alta precisão para uso em processamento agrícola**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 578-589, 2006.
- FORTES, M.; MARTINS, J. H; AMANTÉA, R. P.; FERREIRA, W. R. Transient and spatial energy and exergy analysis of deep-bed corn drying. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. Annual International Meeting, 2009. Número do Paper: 090064.

- 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.
- GOLMOHAMMADI, Morteza *et al.* Energy efficiency investigation of intermittent paddy rice dryer: Modeling and experimental study. **Food and bioproducts processing**, v. 94, p. 275-283, 2015.
- GOLPOUR, Iman *et al.* Energetic and exergetic analysis of a convective drier: A case study of potato drying process. **Open Agriculture**, v. 5, n. 1, p. 563-572, 2020.
- 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.
- HUNTER, A. J. **Pressure difference across an aerated seed bulk for some common duct ant 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: 29 nov. 2019.
- IVANOVA, Miroslava; KATRANZHEV, Nedyalko; DOSPATLIEV, Lilko. USING SOME MATHEMATICAL MODELS IN MODELING MUSHROOM DRYING AGARICUS BISPORUS. **International Journal of Applied Mathematics**, v. 33, n. 1, p. 109, 2020.
- 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.
- JIN, Xu *et al.* Study on drying characteristics of corn based on 3D model. **International Journal of Food Engineering**, v. 1, n. ahead-of-print, 2020.
- KUCUK, Haydar *et al.* A review on thin-layer drying-curve equations. **Drying Technology**, v. 32, n. 7, p. 757-773, 2014.
- 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.
- LI, Bin *et al.* Exergoeconomic analysis of corn drying in a novel industrial drying system. **Entropy**, v. 22, n. 6, p. 689, 2020.
- LIU, Zhe *et al.* Numerical simulation and experimental study of deep bed corn drying based on water potential. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, 2015.
- MAHAPATRA, Archana; TRIPATHY, P. P. Experimental investigation and numerical modeling of heat transfer during solar drying of carrot slices. **Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 5, p. 1287-1300, 2019.
- MALEKJANI, Narjes; JAFARI, Seid Mahdi. Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. **Trends in Food Science & Technology**, v. 78, p. 206-223, 2018.

- 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.
- MUGI, Vishnuvardhan Reddy; CHANDRAMOHAN, V. P. Energy and exergy analysis of forced and natural convection indirect solar dryers: Estimation of exergy inflow, outflow, losses, exergy efficiencies and sustainability indicators from drying experiments. **Journal of Cleaner Production**, v. 282, p. 124421, 2021.
- 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.
- NEJADI, Jalil; NIKBAKHT, Ali Mohammad. Numerical simulation of corn drying in a hybrid fluidized bed-infrared dryer. **Journal of food process engineering**, v. 40, n. 2, p. e12373, 2017.
- NIELD, D.; BEJAN, A. **Convection in porous media**. 4.ed. Nova Iorque: Springer, 2013. 778 p
- NORTON, T.; SUN, D. W. Computational fluid dynamics (CFD) - an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 17, n. 11, p. 600-620, 2006.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- RAMACHANDRAN, Rani Puthukulangara *et al.* Computational fluid dynamics in drying process modelling—a technical review. **Food and bioprocess technology**, v. 11, n. 2, p. 271-292, 2018.
- RANI, Poonam; TRIPATHY, P. P. Drying characteristics, energetic and exergetic investigation during mixed-mode solar drying of pineapple slices at varied air mass flow rates. **Renewable Energy**, v. 167, p. 508-519, 2021.
- RANJBARAN, M.; ZARE, D. Simulation of energetic and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. **Energy**, v. 59, p. 484-493, 2013.
- RANJBARAN, M.; EMADI, B.; ZARE, D. CFD simulation of deep-bed paddy drying process and performance. **Drying Technology**, v. 32, n. 8, p. 919-934, 2014.

- ROCHA, K. S.; MARTINS, J. H.; MARTINS, M. A.; SARAZ, J. A.; LACERDA FILHO, A. F. **Three-dimensional modeling and simulation of heat and mass transfer processes in porous media: An application for maize stored in a flat bin.** *Drying Technology*, v. 31, n. 10, p. 1099-1106, 2013.
- SALVATIERRA-ROJAS, Ana et al. CFD-Simulink Modeling of the Inflatable Solar Dryer for Drying Paddy Rice. *Applied Sciences*, v. 11, n. 7, p. 3118, 2021.
- SANGHI, Achint; AMBROSE, RP Kingsly; MAIER, Dirk. CFD simulation of corn drying in a natural convection solar dryer. *Drying technology*, v. 36, n. 7, p. 859-870, 2018.
- SHEDD, C. K. **Resistance of grains and seeds to airflow.** *Agricultural Engineering*, v. 34, n. 9, p. 616-619, 1953
- SILVA, J. S. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas.** 2. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 560 p.
- SOUZA, J. L. F. **Simulação de secador cilíndrico de grãos com fluxos radial e axial de ar.** 97 f. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: UFMG, 1996.
- SRIVASTAVA, V. K.; JOHN, J. Deep bed grain drying modeling. *Energy Conversion and Management*, v. 43, n. 13, p. 1689-1708, 2002.
- SYAHRUL, S.; HAMDULLAHPUR, F.; DINCER, I. Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles. *International Journal of Thermal Sciences* 2003;42(7):691–701
- TOLENTINO, E. L. **Análise energética e exergética da secagem de grãos de milho em leito fixo utilizando o Método de Volumes Finitos.** 117f. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: CEFET-MG, 2018.
- TOHIDI, Mojtaba; SADEGHI, Morteza; TORKI-HARCHEGANI, Mehdi. **Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 70, p. 519-528, 2017.
- THOMPSON, T. L., PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying – A new model. *ASAE*, Saint Joseph, v. 11, n. 4, p. 582-586, 1968.
- THORPE, G. R. The application of computational fluid dynamics codes to simulate heat and moisture transfer in stored grains. *Journal of Stored Products Research*, v. 44, n. 1, p. 21-31, 2008.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An introduction to computational fluid dynamics. **The finite volume method**, 1995.
- VISCONCINI, A. R. **Modelagem, simulação e análise utilizando CFD para escoamento fluidodinâmico em um secador industrial do tipo torre de fluxo misto.** 97 f. Dissertação de Mestrado. Maringá: UEM, 2019.
- VITORINO, R. B. **Modelagem e simulação matemática do processo de secagem de milho.** 52 f. Dissertação de Mestrado. Dourados: UFGD, 2009.

WEI, Shuo et al. A heat and mass transfer model based on multi-component heterogeneity for corn kernel tempering drying: Development and application. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 171, p. 105335, 2020.

ZARE, D.; MINAEI, S.; ZADEH, M. M.; KHOSHTAGHAZA, M. H. Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 18, p. 3241-3254, 2006.

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

ZHAO, Lijuan *et al.* A 3-dimensional body fitted simulation of heat and mass transfer in rice kernel during hot air drying process. **International Journal of Food Engineering**, v. 15, n. 3-4, 2019.

ZHAO, Y.; HUANG, K.; CHEN, X.F., WANG, F.H., CHEN, P.X., TU, G. YANG, D.Y. Tempering-Drying Simulation and Experimental Analysis of corn kernel. **International Journal of food engineering**, v 14, n 1, 2018.

APÊNDICE A – MACROS UTILIZADAS NO PROGRAMA

Macro	Função	Observação
<i>UDS (User-Defined Scalar) e UDM (User-Defined Memory)</i>		
C_UDSI(c, t, 0)	Representação da equação de balanço de umidade para o ar	As demais equações de conservação foram empregadas utilizando os próprios modelos disponíveis no ANSYS
C_UDMI(c, t, 0)	Teor de umidade do leito de grãos	O ANSYS permite armazenar determinadas variáveis em memórias para um posterior acesso.
C_UDMI(c, t, 1)	Variação do teor de umidade do leito de grãos	
C_UDMI(c, t, 2)	Umidade relativa do ar	
C_UDMI(c, t, 3)	Calor latente de vaporização da água	
C_UDMI(c, t, 4)	Termo fonte da equação de balanço de umidade do ar	
C_UDMI(c, t, 5)	Termo fonte da equação de balanço de energia para o leito de grãos	
C_UDMI(c, t, 6)	Coefficiente de transferência de calor entre o ar e o leito de grãos	
C_UDMI(c, t, 7)	Massa específica do milho	
C_UDMI(c, t, 8)	Condutividade térmica do milho	
C_UDMI(c, t, 9)	Coefficiente de difusão de umidade efetiva	
C_UDMI(c, t, 10)	Porosidade do leito de grãos	
C_UDMI(c, t, 11)	Resistência viscosa ao escoamento de ar na vertical	
C_UDMI(c, t, 12)	Resistência viscosa ao escoamento de ar na horizontal	
C_UDMI(c, t, 13)	Resistência inercial ao escoamento de ar na vertical	
C_UDMI(c, t, 14)	Resistência inercial ao escoamento de ar na horizontal	
C_UDMI(c, t, 15)	Energia demandada para evaporação da umidade dos grãos	
C_UDMI(c, t, 16)	Exergia demandada para evaporação da umidade dos grãos	
<i>DEFINE macros</i>		
DEFINE_INIT	Define as condições iniciais do problema (teor de umidade e temperatura do leito de grãos e temperatura, umidade relativa e umidade absoluta do ar intergranular)	
DEFINE_ADJUST	Atualiza o teor de umidade do leito de grãos a cada intervalo de tempo para célula computacional do domínio ao longo do tempo	

DEFINE_SOURCE	Calcula o termo fonte	Existem duas macro, sendo uma da equação de transferência de umidade para o ar e outra da equação de balanço de energia para o leito de grãos
DEFINE_PROPERTY	Especifica uma propriedade de um determinado material	
DEFINE_SPECIFIC_HEAT	Define uma função dependente da temperatura para o calor específico	
DEFINE_PROFILE	Define um perfil ou condição de contorno na célula que pode variar de acordo com as coordenadas espaciais ou com o tempo	
DEFINE_DIFFUSIVITY	Especifica a difusividade para as equações de transporte de espécies	

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE B – RELATÓRIO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS PARA GEOMETRIA BIDIMENSIONAL DOS EXPERIMENTOS DE SECAGEM

- **Experimento 1**

Tabela 1 – Confrontação dos dados experimentais de teor de umidade médio do leito de grãos (base seca) com os resultados numéricos em função do tempo e o erro relativo percentual

Tempo [min]	Experimento 1 ($T_{in}=40^{\circ}\text{C}$; $v=0,8\text{m/s}$)		
	Experimental (%)	Numérico (%)	Erro (%)
0	22,0	22,00	0
10	21,3	21,09	1,0042
20	20,5	20,44	0,2907
30	19,9	19,93	0,1659
40	19,4	19,51	0,5474
50	19,1	19,13	0,1767
60	18,6	18,80	1,0815
70	18,4	18,50	0,5404
80	18,0	18,22	1,2359
90	17,7	17,97	1,5027
100	17,5	17,73	1,2957
110	17,2	17,50	1,7578
120	17,0	17,29	1,7106

Tabela 2 – Eficiências

Tempo (min)	Eficiência Energética (%)	Eficiência Exergética (%)
10	40,75	1,59
20	28,04	1,31
30	22,98	1,12
40	17,90	0,99
50	17,93	0,89
60	15,4	0,81
70	12,85	0,75
80	12,87	0,70
90	10,32	0,66
100	10,34	0,62
110	10,35	0,59
120	10,37	0,56

Tabela 3 – Temperaturas ao longo do secador

Tempo (min)	Temp. 1 (45mm) (°C)	Temp. 2 (90mm) (°C)	Temp. 3 (135mm) (°C)	Temp. 4 (180mm) (°C)	Temp. Média (°C)
10	40,80	39,26	37,58	35,65	38,32
20	41,26	40,22	39,19	38,14	39,70
30	41,47	40,64	39,81	38,99	40,23
40	41,59	40,89	40,19	39,49	40,54
50	41,68	41,06	40,45	39,83	40,76
60	41,74	41,19	40,64	40,08	40,91
70	41,79	41,29	40,79	40,28	41,04
80	41,83	41,37	40,90	40,44	41,14
90	41,87	41,44	41,00	40,57	41,22
100	41,90	41,49	41,08	40,68	41,29
110	41,92	41,54	41,16	40,77	41,35
120	41,94	41,58	41,22	40,86	41,40

- **Experimento 2**

Tabela 1 – Confrontação dos dados experimentais de teor de umidade médio do leito de grãos (base seca) com os resultados numéricos em função do tempo e o erro relativo percentual

Tempo [min]	Experimento 2 ($T_{in}=40^{\circ}C$; $v=1,3m/s$)		
	Experimental (%)	Numérico (%)	Erro (%)
0	22,5	22,50	0
10	21,3	21,47	0,7875
20	20,6	20,79	0,9461
30	20,1	20,27	0,8682
40	19,7	19,84	0,7092
50	19,2	19,46	1,3633
60	18,9	19,13	1,1907
70	18,5	18,82	1,7301
80	18,2	18,54	1,8705
90	18,0	18,28	1,5646
100	17,6	18,04	2,5020
110	17,4	17,81	2,3797
120	17,3	17,60	1,7387

Tabela 2 –Eficiências

Tempo (min)	Eficiência Energética (%)	Eficiência Exergética (%)
10	27,88	0,87
20	18,61	0,66
30	13,98	0,55
40	10,89	0,48
50	10,91	0,43
60	9,37	0,39
70	7,82	0,36
80	7,83	0,33
90	6,28	0,31
100	7,86	0,29
110	6,30	0,28
120	4,73	0,26

Tabela 3 – Temperaturas ao longo do secador

Tempo (min)	Temp. 1 (45mm) (°C)	Temp. 2 (90mm) (°C)	Temp. 3 (135mm) (°C)	Temp. 4 (180mm) (°C)	Temp. Média (°C)
10	38,92	38,92	37,12	36,20	37,79
20	39,18	39,18	37,94	37,32	38,40
30	39,30	39,30	38,30	37,81	38,68
40	39,38	39,38	38,53	38,10	38,84
50	39,43	39,43	38,68	38,31	38,96
60	39,46	39,46	38,79	38,46	39,05
70	39,49	39,49	38,88	38,57	39,11
80	39,52	39,52	38,95	38,67	39,16
90	39,54	39,54	39,01	38,75	39,21
100	39,55	39,55	39,06	38,82	39,25
110	39,57	39,57	39,11	38,87	39,28
120	39,58	39,58	39,14	38,92	39,31

- **Experimento 3**

Tabela 1 – Confrontação dos dados experimentais de teor de umidade médio do leito de grãos (base seca) com os resultados numéricos em função do tempo e o erro relativo percentual

Tempo [min]	Experimento 3 ($T_{in}=50^{\circ}C$; $v=0,8m/s$)		
	Experimental (%)	Numérico (%)	Erro (%)
0	22,0	22,00	0
10	21,0	20,87	0,5974
20	19,9	20,03	0,6430
30	19,3	19,36	0,3099
40	18,6	18,80	1,0656
50	18,1	18,31	1,1559
60	17,7	17,87	0,9824
70	17,3	17,48	1,0418
80	16,9	17,12	1,3028
90	16,6	16,79	1,1318
100	16,3	16,48	1,0984
110	16,0	16,19	1,1896
120	15,6	15,92	2,0459

Tabela 2 –Eficiências

Tempo (min)	Eficiência Energética (%)	Eficiência Exergética (%)
10	33,73	2,41
20	24,89	2,00
30	19,60	1,70
40	17,87	1,50
50	14,33	1,35
60	12,58	1,23
70	12,62	1,14
80	10,85	1,06
90	9,07	0,99
100	9,10	0,93
110	9,13	0,88
120	9,16	0,83

Tabela 3 – Temperaturas ao longo do secador

Tempo (min)	Temp. 1 (45mm) (°C)	Temp. 2 (90mm) (°C)	Temp. 3 (135mm) (°C)	Temp. 4 (180mm) (°C)	Temp. Média (°C)
10	48,29	46,21	43,93	41,25	44,92
20	48,89	47,49	46,09	44,69	46,79
30	49,17	48,05	46,93	45,82	47,49
40	49,34	48,39	47,44	46,50	47,92
50	49,46	48,63	47,79	46,96	48,21
60	49,55	48,80	48,06	47,31	48,43
70	49,62	48,94	48,26	47,58	48,60
80	49,68	49,05	48,43	47,80	48,74
90	49,72	49,15	48,57	47,99	48,86
100	49,76	49,22	48,68	48,14	48,95
110	49,80	49,29	48,78	48,27	49,04
120	49,83	49,35	48,87	48,38	49,11

- **Experimento 4**

Tabela 1 – Confrontação dos dados experimentais de teor de umidade médio do leito de grãos (base seca) com os resultados numéricos em função do tempo e o erro relativo percentual

Tempo [min]	Experimento 4 ($T_{in}=50^{\circ}C$; $v=1,3m/s$)		
	Experimental (%)	Numérico (%)	Erro (%)
0	22,1	22,10	0
10	20,9	20,80	0,4999
20	20,1	19,88	1,1111
30	19,3	19,16	0,7078
40	18,9	18,57	1,7524
50	18,3	18,05	1,3440
60	17,8	17,60	1,1364
70	17,5	17,19	1,7916
80	17,2	16,81	2,2598
90	16,8	16,47	1,9886
100	16,5	16,15	2,1482
110	16,3	15,85	2,7818
120	15,9	15,57	2,0996

Tabela 2 – Eficiências

Tempo (min)	Eficiência Energética (%)	Eficiência Exergética (%)
10	20,86	1,68
20	15,46	1,29
30	10,94	1,07
40	10,06	0,93
50	8,26	0,83
60	7,37	0,75
70	6,47	0,69
80	6,49	0,64
90	5,58	0,59
100	5,60	0,56
110	4,69	0,52
120	4,71	0,50

Tabela 3 – Temperaturas ao longo do secador

Tempo (min)	Temp. 1 (45mm) (°C)	Temp. 2 (90mm) (°C)	Temp. 3 (135mm) (°C)	Temp. 4 (180mm) (°C)	Temp. Média (°C)
10	49,26	48,01	46,75	45,46	47,37
20	49,61	48,73	47,85	46,97	48,29
30	49,79	49,08	48,37	47,66	48,72
40	49,90	49,29	48,69	48,09	48,99
50	49,97	49,44	48,91	48,39	49,18
60	50,03	49,55	49,08	48,61	49,32
70	50,07	49,64	49,21	48,78	49,43
80	50,11	49,71	49,32	48,92	49,51
90	50,14	49,77	49,40	49,03	49,58
100	50,16	49,82	49,48	49,13	49,65
110	50,18	49,86	49,54	49,22	49,70
120	50,20	49,90	49,60	49,29	49,75

- **Experimento 5**

Tabela 1 – Confrontação dos dados experimentais de teor de umidade médio do leito de grãos (base seca) com os resultados numéricos em função do tempo e o erro relativo percentual

Tempo [min]	Experimento 5 ($T_{in}=60^{\circ}\text{C}$; $v=0,8\text{m/s}$)		
	Experimental (%)	Numérico (%)	Erro (%)
0	22,5	22,50	0
10	21,2	21,10	0,4794
20	20,0	19,94	0,3136
30	19,1	19,01	0,4547
40	18,3	18,24	0,3488
50	17,7	17,56	0,7827
60	17,2	16,96	1,3770
70	16,6	16,42	1,0562
80	16,1	15,93	1,0274
90	15,8	15,48	1,9957
100	15,3	15,07	1,5113
110	15,0	14,68	2,1196
120	14,6	14,32	1,9127

Tabela 2 – Eficiências

Tempo (min)	Eficiência Energética (%)	Eficiência Exergética (%)
10	25,71	4,48
20	22,53	3,73
30	17,23	3,18
40	14,06	2,80
50	13,04	2,51
60	10,92	2,28
70	10,98	2,10
80	8,84	1,94
90	8,89	1,81
100	7,83	1,70
110	7,88	1,60
120	6,80	1,51

Tabela 3 – Temperaturas ao longo do secador

Tempo (min)	Temp. 1 (45mm) (°C)	Temp. 2 (90mm) (°C)	Temp. 3 (135mm) (°C)	Temp. 4 (180mm) (°C)	Temp. Média (°C)
10	57,76	54,84	51,56	47,56	52,93
20	58,57	56,58	54,60	52,64	55,60
30	58,97	57,37	55,78	54,20	56,58
40	59,23	57,87	56,51	55,17	57,19
50	59,40	58,21	57,03	55,85	57,62
60	59,53	58,47	57,41	56,35	57,94
70	59,64	58,68	57,72	56,75	58,20
80	59,72	58,84	57,96	57,08	58,40
90	59,79	58,98	58,16	57,34	58,57
100	59,85	59,10	58,34	57,57	58,71
110	59,90	59,20	58,49	57,77	58,84
120	59,95	59,28	58,62	57,94	58,95

- **Experimento 6**

Tabela 1 – Confrontação dos dados experimentais de teor de umidade médio do leito de grãos (base seca) com os resultados numéricos em função do tempo e o erro relativo percentual

Tempo [min]	Experimento 6 ($T_{in}=60^{\circ}\text{C}$; $v=1,3\text{m/s}$)		
	Experimental (%)	Numérico (%)	Erro (%)
0	22,1	22,10	0
10	20,5	20,47	0,1474
20	19,4	19,26	0,7053
30	18,6	18,32	1,4984
40	17,9	17,54	2,0266
50	17,2	16,86	1,9703
60	16,7	16,26	2,6070
70	16,3	15,73	3,4970
80	15,8	15,25	3,5124
90	15,4	14,80	3,8893
100	15,0	14,39	4,0563
110	14,7	14,01	4,6830
120	14,4	13,66	5,1582

Tabela 2 – Eficiências

Tempo (min)	Eficiência Energética (%)	Eficiência Exergética (%)
10	16,55	3,09
20	12,46	2,39
30	10,14	1,99
40	8,40	1,73
50	6,64	1,53
60	6,68	1,38
70	5,50	1,26
80	4,92	1,17
90	4,96	1,08
100	4,37	1,01
110	4,40	0,95
120	3,80	0,89

Tabela 3 – Temperaturas ao longo do secador

Tempo (min)	Temp. 1 (45mm) (°C)	Temp. 2 (90mm) (°C)	Temp. 3 (135mm) (°C)	Temp. 4 (180mm) (°C)	Temp. Média (°C)
10	58,53	56,86	55,19	53,48	56,01
20	58,99	57,78	56,59	55,41	57,19
30	59,22	58,25	57,29	56,33	57,77
40	59,37	58,55	57,73	56,91	58,14
50	59,48	58,76	58,04	57,32	58,40
60	59,56	58,91	58,27	57,63	58,59
70	59,62	59,04	58,45	57,87	58,75
80	59,67	59,14	58,60	58,07	58,87
90	59,71	59,22	58,73	58,24	58,97
100	59,75	59,29	58,83	58,37	59,06
110	59,78	59,35	58,92	58,49	59,13
120	59,80	59,40	59,00	58,60	59,20